КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА «ДЕРЕВА СОБЫТИЙ» И ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

УДК 624.001.25

Тамразян Ашот Георгиевич
Директор НТЦ «Риск и безопасность сооружений»,
Московский государственный строительный университет, советник РААСН,
доктор технических наук, профессор

Существующий опыт проектирования показывает, что невозможно обеспечить живучесть большепролетных систем после отказа основных несущих конструктивных элементов (например, опорного контура висячих оболочек, несущих пилонов и т.п.).

Наиболее экономичным методом обеспечения безопасности от прогрессирующего обрушения конструкций при аварийных воздействиях являются превентивные меры, учитывающие различные аварийные ситуации.

Анализ показывает, что из перечня аварийных ситуаций ошибки проектирования, изготовления или монтажа, некачественные материалы, неправильная эксплуатация сооружений имеют наибольшую вероятность.

При принятии решений должны учитываться:

- причины и вид аварийных воздействий;
- возможные последствия прогрессирующего обрушения, включающие опасность для жизни и здоровья людей, экономические потери;
- стоимость и сложность мероприятий по обеспечению безопасности конструкций от прогрессирующего обрушения.

Нормативный подход по предотвращению прогрессирующего обрушения предполагает, что конструкция не должна терять несущую способность в случае удаления части элементов при аварийных воздействиях.

А устранение или уменьшение влияния аварийных воздействий и потенциальной опасности в целом за счет применения превентивных мероприятий и избыточного повышения степени статической неопределимости системы. Под превентивными методами понимается проведение мероприятий, направленных на предупреждение непредвиденных разрушительных событий с целью снижения вероятности и величины ущерба.

Необходим выбор рациональных конструктивных решений и материалов, обеспечивающих несущую способность сооружения при наличии локальных повреждений, предотвращающих обрушение системы.

При помощи мониторинга риска несущих конструкций сооружения, выявляются дефекты, повреждения конструкций в результате:

- ошибок при проектировании;
- нарушений, допущенных при изготовлении конструкций;

- нарушений условий транспортировки, хранения, монтажа;
- эксплуатации конструкций.

Особое внимание необходимо обратить на то, что прочность и устойчивость сооружения в случае локального аварийного воздействия должны быть обеспечены как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

В качестве примера приведём оценку риска аварии уникальной конструкции покрытия конькобежного центра в Крылатском (г. Москва).

Основные задачи оценки риска:

- определение частот возникновения инициирующих и нежелательных событий;
- оценка последствий возникновения нежелательных событий;
- обобщение оценок риска.

Общие сведения о проекте

Спортивный комплекс "Крылатское" – уникальное сооружение международного уровня как по архитектурно-инженерным решениям, так и по техническому оснащению.

- общая площадь объекта вместе с прилегающей территорией 11,07 га;
- площадь застройки 3,08 га;
- площадь кровли 29 249 кв.м;
- объем здания 434 801 куб.м;
- высота центрального ствола с поддерживающими крышу высокопрочными стальными канатами - вантами 72 м;
- максимальная внутренняя высота кровли 27,6 м;
- общая площадь ледового поля 12 700 кв.м;
- площадь зрительских трибун 4 200 м^2;
- количество сидячих мест на трибуне 7 500.

Основа планировочной схемы здания – полукруг с радиусом 117,3 м для арены и 123,5 м для всего здания (рис.1).

Уникальный проект конструкции покрытия конькобежного центра представляет собой систему радиально расположенных ферм с верхним поясом из клееной древесины, с раскосами и нижним поясом из стальных труб длиной (в осях) 50,4 м, которые для того, чтобы перекрыть пролет помещения ледовой арены (~ 102 м), соединяются между собой в середине пролета через опирание на стальную полукольцевую балку. Балка подвешена в точках, близких к опорам ферм, за растянутые безизгибные 19 вант к Л-образной опоре. Стальная опора высотой ~ 60 м расположена на плите главной опоры на отметке 14,8 м на двух цилиндрических шарнирах и оттягивается в направлении, противоположном направлению вант, двумя стальными оттяжками, заанкеренными в фундамент, объем которого 4374 м^3, а вес 10 935 т.

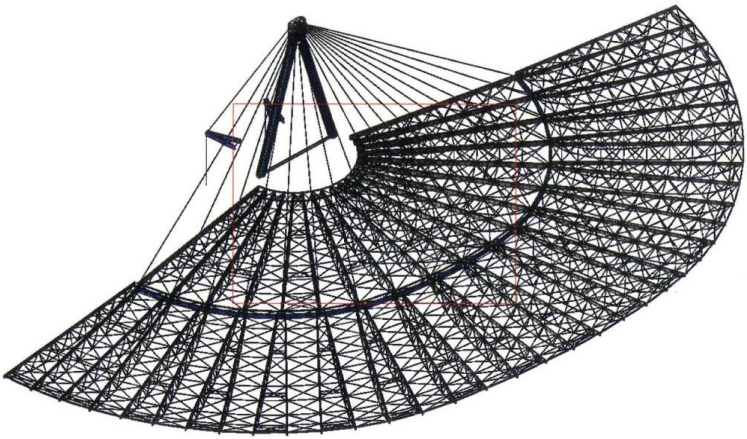

Рисунок 1

Анализ причин аварий сооружения со стальным каркасом и несущими стальными конструкциями

Анализ причин аварий проведен на основе материалов Главгосархстройнадзора России. Причинами аварии явились ошибки при проектировании, просчеты в определении нагрузок, с неудачными решениями связей, неправильным выбором стали для конкретных условий строительства.

Много ошибок допускается при проектировании стальных конструкций неспециализированными организациями. Однако основными являются дефекты, допускаемые при изготовлении и монтаже стальных конструкций.

К числу наиболее часто встречающихся дефектов относятся: неэквивалентная замена материала (класса стали, сечения элементов), изменение проектных размеров конструкций в целом и отдельных элементов, смещение осей от проектных геометрических центров узлов, не прямолинейность (прогнутость) элементов, подрезы металла при сборке, неправильное соединение в монтажных узлах, не обеспечение пространственной жесткости в процессе монтажа, непроектное приложение нагрузки.

Исходя из представленного анализа, выделим следующие возможные причины аварии:

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

Оценка условной вероятности аварии

Практическим инструментом исследования уровня опасностей сооружения является количественный анализ риска.

При назначении уровня надежности сооружения предполагается, что отказы отдельных конструктивных элементов статистически независимы [1]. Для её определения введём три пары противоположных события некоторого базового сценария [2]. На основании сведений, содержащихся в проекте сооружения, и сценария возможной аварии проанализируем основные риски, характерные для данного объекта: вероятность отказов соответственно R(A′)–Л-образной опоры, R(B′) – цепей оттяжек, R(C′) – упора оттяжек. Для упрощения примера надёжность вант не рассматриваем.

События A, B и C есть совместные независимые события. События A и A′, B и B′, C и C′ попарно образуют полную группу несовместных событий. Будем считать, что надёжность сооружения по Л-образной опоре R(A) составляет 0,99985, по цепям оттяжек -R(B) 0,99820 и упору оттяжек R(C) – 0,99960. Тогда надёжность, как вероятность безотказного функционирования в начальный момент времени, будет равна

$$R(A+B+C)=1-[R(A')+R(B')+R(C')-R(A')R(B')-(B')R(C')- -R(A')R(C')+R(A')R(B')R(C')], \quad (1)$$

где $R(A') = 1- R(A)$, $R(B') = 1- R(B)$, $R(C') = 1- R(C)$;

R(A), R(B), R(C) – соответственно вероятности удовлетворения требованиям по Л-образной опоре, по цепям и упору оттяжек.

$$R(A+B+C)=1-[0,00015+0,0018+0,0004–0,00015\cdot0,0018-0,0018\cdot0,0004- -0,00015\cdot0,0004++0,00015\cdot0,0018\cdot0,0004]= 0,99776116.$$

Если требуемую надёжность по цепям и упору оттяжек увеличить до значения 0,99970, то получим надёжность сооружения, равную 0,99930.

Под уязвимостью сооружения понимается вероятность образования одного из возможных сценариев появления ЧС, которые образуют совокупный ущерб, появление и объем которого зависит от степени и характера рискочувствительности и опасности.

Оценим уязвимость сооружения, для которого возможны $x_i (i=1,2,3)$ сценариев развития ущерба сооружения, приходящих на разные конструкции. В этом случае надёжность сооружения определится в зависимости от вероятности отказов P_1, P_2, P_3 конструкций:

$$R_c = 1- (P_1 P_2 + P_1R_2P_3 – R_1 P_2 P_3) = R_1R_2 +R_1 P_2R_3 + P_1R_2R_3.$$

При $R_1=R_2=R_3=R=0{,}995$ получим:

$$R_c= R^2\cdot(1+2\cdot P)= 0{,}995^2\cdot[1+2\cdot(1-0{,}995)]= 0{,}99992525.$$

Надежность сооружения

$$R(x_1,x_2,x_3)=1-[P^2\cdot(1+2R]=R^2\cdot(1+2P)=0{,}995^2\cdot[1+2\cdot(1-0{,}995)]= 0{,}99992525.$$

В случае, когда число конструкций в сооружении n>1, необходимо определить, с какого конструктивного элемента начать регулирование надежности для того, чтобы получить наиболее оптимальный уровень безопасности.

Воспользуемся количественными характеристиками «весомость», «значимость» и «вклад» конструкций в надёжности сооружения.

Относительная весомость конструктивного элемента *x* в системе из *n* элементов определится

$$g_{xi} = \frac{G\{\Delta x_i y(x_1,\ldots,x_n)\}}{2^n} = \sum_{j=1}^{l} 2^{-(r_j-1)} - \sum_{f=1}^{k} 2^{-(r_f-1)}. \qquad (2)$$

При наличии информации о надежности конструктивного элемента их влияние на надежность сооружения можно оценить с помощью понятия «значимость» конструкции в данном сооружении.

«Значимость» конструкции x_i в системе $f(x_1,\ldots,x_n)$ есть частная производная от вероятности безотказной работы системы R_c по вероятности безотказной работы конструкции R_i, то есть

$$\xi_{x_i} = \frac{\partial \mathrm{P}\{f(x_1,\ldots,x_n)\}=1}{\partial \mathrm{P}\{x_i=1\}} = \frac{\partial Rc}{\partial Ri}. \qquad (3)$$

«Весомость» конструкции есть частный случай его «значимости» при одинаковой надежности всех конструкций и вероятности безотказной работы, равной 0,5. Кроме того «значимость» показывает зависимость от вероятностей безотказной работы всех других конструкций сооружения кроме самой *i*-й конструкции.

«Значимость» конструкции x_i,($i=1,2,3$) для рассматриваемого сооружения

$$R_c = 1-(P_1 P_2 + P_1R_2P_3 + R_1 P_2 P_3). \qquad (4)$$

$$\xi_{x_1} = \frac{\partial R_c}{\partial R_1} = R_2+ P_2 R_3- R_2 R_3 = 0{,}00995;$$

$$\xi_{x_2} = \frac{\partial R_c}{\partial R_2} = R_1+ P_1 R_3- R_1 R_3 = 0{,}00995;$$

$$\xi_{x_3} = \frac{\partial R_c}{\partial R_3} = R_{c_1}^{(3)} - R_{c_0}^{(3)} = R_1\ \mathrm{P}_2 + \mathrm{P}_1\ \mathrm{R}_2 = 0{,}00995.$$

Критерий «значимость» характеризует скорость изменения надёжности сооружения, позволяет определять элементы, обеспечивающие максимальное приращение надёжности всего сооружения.

«Вклад» конструкции x_i в систему $f(x_1,\ldots,x_n)$ есть произведение вероятности безотказной работы конструкции R_i на его «значимость», то есть

$$B_{x_i} = R\frac{\partial R_c}{\partial R_i} = R\frac{R_c - R_{c0}^{(i)}}{R_i} = R_c - R_{c0}^{(i)}\cdot \qquad (5)$$

Критерий «вклад» характеризует приращение надёжности сооружения после восстановления конструкций x_i из неработоспособного состояния в работоспособное с фактической вероятностью его безотказной работы, равной R_i.

Определим вклады конструкций $x_i(i=1,2,3)$ в надёжность сооружения

$$B_{x_1} = B_{x_2} = B_{x_3} = 0{,}995 \cdot 0{,}00995 = 0{,}00990025\cdot$$

Удельный или «нормированный вклад» конструкции x_i в сооружении $f(x_1,\ldots,x_n)$

$$b_{x_i} = B_{xi} \Big/ \sum_{i=1}^{n} B_{x_i} \qquad (6)$$

Для конструкции будет

$$b_{x_1} = b_{x_2} = b_{x_3} = 0{,}00990025/(0{,}00990025\times 3) = 0{,}333.$$

Критерий «вклад» позволяет рационально определять очередность восстановления конструкций в составе сооружения.

Проанализируем возможность варьирования надёжностью сооружения. На примере заданной опасности рассмотрим случай приращения надёжности и покажем, что рациональный выбор мер защиты позволяет добиться заданной надёжности сооружения. Это приводит к экономии материальных ресурсов или уменьшению соответствующих рисков.

Назначим начальные вероятности безотказной работы конструкций одинаковыми: $R_1=R_2=R_3=0{,}9000$ и определим начальную надёжность сооружения в виде вероятностной функции:

$$\mathrm{R}_{\mathrm{c,нач}} = \mathrm{R}_{\mathrm{c}}=1\ (\ \mathrm{P}_1\ \mathrm{P}_2 + \mathrm{P}_1\mathrm{R}_2\mathrm{P}_3 + \mathrm{R}_1\ \mathrm{P}_2\ \mathrm{P}_3) = \mathrm{R}_1\mathrm{R}_2 + \mathrm{R}_1\ \mathrm{P}_2\ \mathrm{R}_3 + \mathrm{P}_1\mathrm{R}_2\mathrm{R}_3, \qquad (7)$$

или

$$R_{с,нач} = R^2 (1+2 \cdot P) = 0,90^2[1+2\cdot(1-0,90)] = 0,9720.$$

Проведем постепенное повышение надёжности конструкций до значений 0,9950, например, путем снижения расчетных нагрузок.

Разница уровней надёжности конструкций составит

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = 0,9950-0,9000 =0,095.$$

Надёжность сооружения с учетом приращения найдём по формуле (4)

$$R_c = 0,9950^2\cdot[1+2\cdot(1-0,9950)]= 0,99992525.$$

Соответственно, риск равен $74,8\cdot10^{-6}$.

Отметим, что надёжность сооружения увеличивается не пропорционально увеличению надёжности конструктивных элементов. Начальный уровень надёжности определяется внутренними параметрами, например, для конструкции это использование качественных материалов, осуществление предупредительных мероприятий, использование эффективных систем контроля технологических процессов. А изменения надёжности сооружения можно добиться, например, повышением качества проектирования, уровнем технологии, обеспеченностью прочности материалов и нагрузок, созданием необходимых резервов, материальных и финансовых ресурсов ликвидации ЧС и т.п.

Таким образом, надёжность сооружения можно представить в виде суммы начальной надёжности и приращений, что наглядно показывает роль каждой компоненты. Проектируя сложные сооружения по критерию надёжности, можно добиться существенной экономии ресурсов.

При оценке уязвимости для получения достоверных результатов об их эксплуатационной пригодности следует уделить внимание регистрации отклонений тех параметров конструкции, которые в большей мере влияют на надёжность сооружения [3]. При более высокой изменчивости параметров повышается уязвимость конструкций, при более низкой наблюдается избыточная материалоемкость. Для их баланса необходимы строгие научные предпосылки, базирующиеся на теории надёжности [4].

Условные вероятности аварии по причинам отказа основных элементов стальной конструкции покрытия конькобежного центра в Крылатском определены методом анализа «дерева событий».

Распределение условной вероятности аварии по возможным причинам отказа основных элементов стальной конструкции показано на рис.2.

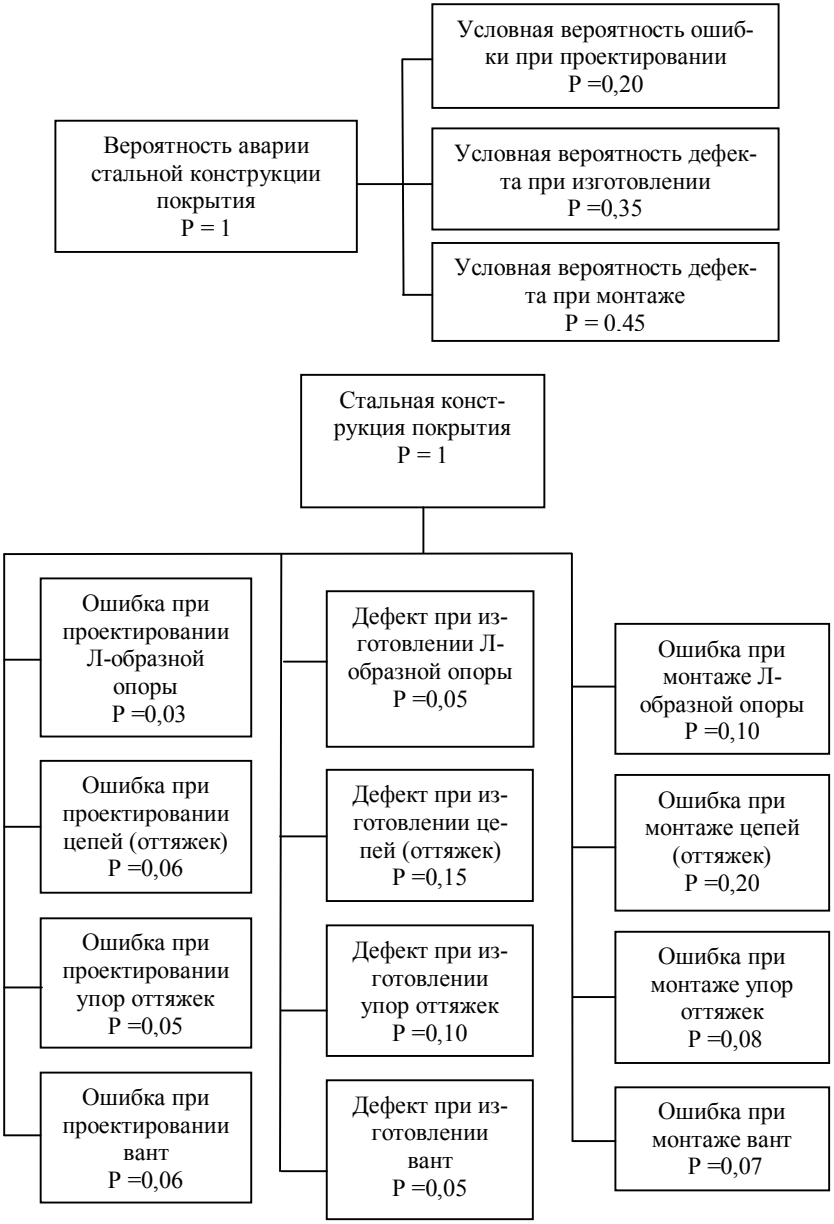

Рис. 2. Распределение условной вероятности отказа основных элементов стальной конструкции покрытия

Оценка возможного ущерба от аварии

Величина риска определяется

$$P = P(H)\cdot P(S/H)\cdot P(T/H)\cdot P(D/H)\cdot C, \quad (8)$$

где P(H) – вероятность возникновения опасности;

P(S/H) и P(T/H) – вероятность встречи опасности с рассматриваемым объектом в пространстве и времени;

P(D/H) – вероятность нанесения ущерба данного уровня разрушения, гибели людей и т.п.;

C – стоимость объекта, численность населения и другие общие показатели.

Критерии техногенного риска:

1. Количественно характеризуют опасность
2. Отражают целевую направленность, эффективность защиты
3. Чувствительны к изменению условий
4. Определение численного значения базируется на моделях, характеризующих опасность и реакцию объектов на эту опасность
5. Определяются вероятностными методами с учетом случайного характера проявления факторов риска.

Так как все ущербы, возникающие вследствие отказов, имеют стоимостное выражение, то целевая функция сводится к определению:

$$U = n(T) - C_0 - \sum_{j=1}^{m}\int_0^T e^{-\varepsilon t}\overline{U}_j(t)dt, \quad (9)$$

где U – функция полезности конструкции;

П(Т) – прибыль, ожидаемая от эксплуатации конструкции в течение ее расчетного срока службы Т с учетом возможного отказа в момент времени $t < T$;

C_0 – ожидаемое значение величин единовременных затрат на возведение конструкции;

m – число различных видов отказа;

$\overline{U}_j(t)$ – ожидаемая скорость накопления ущерба в результате отказа j-го вида;

ε – коэффициент, учитывающий отдаленность затрат;

t – время, отсчитываемое от момента изготовления конструкции;

Т – срок службы сооружения.

Если учет ожидаемой прибыли *П(Т)* не представляется возможным и учитывается лишь один вид четкого отказа, а вероятностью повторных отказов можно пренебречь, то функция полных ожидаемых затрат или функция приведенных затрат:

$$C = C_0 + C_{эксплл} \cdot P_f, \tag{10}$$

где $C_{эксплл} = C_{стр} + C_{отр}$ – эксплуатационные затраты;

$C_{стр}$– строительные затраты, связанные с ликвидацией последствий отказа (замена или ремонт отказавших или поврежденных элементов конструкции);

$C_{отр}$– отраслевые затраты, связанные с ликвидацией последствий отказа (остановка, переналадка процесса в сооружении);

P_f – вероятность отказа конструкции.

Определение $C_{эксп}$ на стадии проектирования часто бывает затруднителен. Поэтому целесообразно осуществить переход к относительным величинам. Целевую функцию можно преобразовать к виду:

$$C = C_0(1 + \alpha \cdot P_f), \tag{11}$$

где $\alpha = C_{эксплл} / C_0$ - коэффициент экономической ответственности конструкции.

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

Ущерб от аварии определяется по формуле:

$$П_о = П_{пп} + П_{сэ} + П_к, \tag{12}$$

где $П_о$ – полный ущерб, руб.;

$П_{пп}$ – прямые потери руб.;

$П_{сэ}$ – социально-экономические потери (затраты, понесенные вследствие гибели и ранения людей), руб.;

$П_к$ – косвенный ущерб руб.;

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

Стоимость строительства ККЦ «Крылатское» составила 8122365,01 тыс. руб. или $C_0 = 8{,}1*10^9$ руб.

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

Косвенный ущерб может быть определен как убытки из-за недополучения прибыли. Годовая прибыль ККЦ составляет 76331760 руб. в год, ежемесячная прибыль составляет в среднем 6360980 руб. В безразмерном виде

$$C_к = 0{,}78 * 10^{-3}\ C_0 * n,$$

где n – число месяцев простоя.

Отказ Л-образной опоры

При отказе Л-образной опоры возможно разрушение несущих элементов конструкции покрытия (вантовой системы, кольцевой балки, на которую опираются балки 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 два года. Таким образом возможный косвенный ущерб $C_к = 18{,}72 * 10^{-3}\ C_0$.

Вид ущерба	Значение ущерба
Прямые потери	$0{,}6C_0 = 60 * 10^{-3}\ C_0$
Социально-экономические потери	$(300+0{,}07.700)0{,}98 * 10^{-3}$ Co
Косвенный ущерб	$18{,}72 * 10^{-3}$ Co
Полный ущерб	$420{,}72 * 10^{-3}$ Co
Примечание: Предполагается, что 300 человек с летальным исходом, 700 получают ранения различной степени тяжести. Стоимость лечения составляет 7% от $C_ч$.	

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 один год. Таким образом возможный косвенный ущерб Ск = 9,36 *10^{-3} Со.

Вид ущерба	Значение ущерба
Прямые потери	0,025C_0=2,5*10^{-3} Со
Социально-экономические потери	(0,07.10) 0,98 *10^{-3} Со
Косвенный ущерб	9,36 *10^{-3} Со
Полный ущерб	12,62*10^{-3} Со

Отказ одной из упор оттяжек

Вид ущерба	Значение ущерба
Прямые потери	0,1C_0= 10*10^{-3} Со
Социально-экономические потери	(10+0,07.50) 0,98 *10^{-3} Со
Косвенный ущерб	1,25. 9,36 *10^{-3} Со
Полный ущерб	34,9*10^{-3} Со

Отказ одной ванты

Вид ущерба	Значение ущерба
Прямые потери	0,05C_0= 50*10^{-3} Со
Социально-экономические потери	(0,07.20) 0,98 *10^{-3} Со
Косвенный ущерб	9,36 *10^{-3} Со
Полный ущерб	60,8*10^{-3} Со

Обобщение оценок риска и ранжирование причин аварии по степени риска реализации угроз

Причина аварии	Элемент стальной конструкции	Условная вероят-ность	Ущерб	Риск	Ранг
Ошибка при про-ектирова-нии	Л-образная опора	0,03	420,72*10^{-3} Со	12,6*10^{-3} Со	3
	оттяжки	0,06	12,62*10^{-3} Со	0,8*10^{-3} Со	12
	упоры оттяжек	0,05	34,9*10^{-3} Со	1,7*10^{-3} Со	11
	ванты	0,06	60,8*10^{-3} Со	3,6*10^{-3} Со	5
Дефект при изго-товлении	Л-образная опора	0,05	420,72*10^{-3} Со	21*10^{-3} Со	2
	оттяжки	0,15	12,62*10^{-3} Со	1,9*10^{-3} Со	10
	упоры оттяжек	0,10	34,9*10^{-3} Со	3,49*10^{-3} Со	6
	ванты	0,05	60,8*10^{-3} Со	3,04*10^{-3} Со	7
Ошибка при мон-таже	Л-образная опора	0,1	420,72*10^{-3} Со	42,07*10^{-3} Со	1
	оттяжки	0,2	12,62*10^{-3} Со	2,52*10^{-3} Со	9
	упоры оттяжек	0,08	34,9*10^{-3} Со	2,79*10^{-3} Со	8
	ванты	0,07	60,8*10^{-3} Со	4,26*10^{-3} Со	4

Выводы и рекомендации

На основании результатов анализа риска предлагается конкретная программа мер по предупреждению техногенных аварий. Знание стоимости внедрения мероприятий позволяет обоснованно разрабатывать программу наиболее эффективных мер по повышению защищенности объекта от техногенных аварий, т.е. оптимального расходования резерва предупредительных мероприятий.

Анализ «дерева событий» показывает, что наибольший риск проявляется при выходе из строя Л-образной опоры, особенно при монтаже. Далее по степени опасности – это ванты и оттяжки.

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, используя один из основных принципов выбора рациональных мер защиты – принцип достаточности.

1. Л-образную опору усилить контрфорсами, разгрузив тем самым 2 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, примерно равна $1C_ч$. То есть, стоимость дополнительных поперечных связей жесткости, поддерживающих ферму при выходе из строя ванты, равна $1,25C_ч$.

Общая стоимость мероприятий по обеспечению безопасности конструкций покрытия конькобежного центра составит: 2 контрфорса -$8C_ч$; 56 дополнительных поперечных связей жесткости- $56*1,25C_ч = 70C_ч$.

Всего: $78C_ч$., или $78*0,98*10^{-3} C_0 = 76*10^{-3} C_0$.

В итоге получаем, что антирисковые мероприятия в размере 8% от стоимости объекта уменьшают риск с $12,6*10^{-3} C_0$ до $0,80*10^{-3} C_0$ т.е. в 16 раз.

А реальный ущерб при этом сокращается с $420,72*10^{-3}C_0$ до $12,62*10^{-3}C_0$ т.е. в 34 раза.

Такие мероприятия будут востребованы и эффективны при ошибках при проектировании, наличии дефектов при изготовлении, ошибках при монтаже.

Библиографический список

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. - М.: Наука, 1998.
2. Bennet R.M., Ang A.H.-S. Formulation of structural systems reliability//I.of Engineering mechanics. 1986, vol.112 №11, pp.1135-1164.
3. Булгаков С.Н., Тамразян А.Г., Рахман И.А., Степанов А.Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / Под общ. ред. А.Г. Тамразяна. - М.: МАКС Пресс, 2004. – 304 с.
4. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании // Монография. -М.: Изд-во АСВ, 1998. -304 с.