

**В.В. Надольский, А.В. Осипчик**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь*

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУКОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ АВАРИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

*Аннотация: В статье с практической точки зрения рассмотрены различные методики полуколичественной оценки риска аварии зданий и сооружений. В результате оценки получены рекомендации для дальнейшей эксплуатации исследуемого объекта. Произведена повторная оценка риска аварии на объекте после проведенных работ по реконструкции и ремонту.*

Основным требованием при проектировании зданий является обеспечение конструкционной безопасности, характеризующей способность несущего каркаса сопротивляться воздействиям с учетом особых ситуаций и трактуемая как отсутствие в нем недопустимого риска аварии. На сегодняшний день проблема оценки рисков приобретает все больший практический интерес, однако реализации концепции оценки и управления рисками остается затруднительной из-за отсутствия единых методик, закрепленных на нормативном уровне. В настоящей работе уделено внимание отечественной практике полуколичественной оценке рисков.

В данной работе принята методика полуколичественной оценки рисков на основе лингвистической переменной «очень», предложенная А.П. Мельчаковым [3]. Также рассмотрена методика определения вероятности аварии на основании анализа условий, влияющих на надежность сооружений, используя экспертные оценки, предложенная М.Ф. Гафуровой [5].

В качестве объекта исследования приняты строительные конструкции сильвинитовой обогатительной фабрики в осях 27-34/А-Ж, Любанский район, Минская область. Сведения об объекте: сильвинитовая обогатительная фабрика представляет собой разновысотное многоэтажное здание каркасного типа прямоугольной формы в плане с размерами в крайних осях 282,0х96,0 м, высотой до верха покрытия 60,2 м; основными несущими конструкциями здания сильвинитовой обогатительной фабрики являются стальные колонны, балки и стропильные фермы; пространственная жесткость и устойчивость обеспечивается системой вертикальных и горизонтальных связей, дисками покрытия и перекрытий и жестким сопряжением колонн с фундаментами; рассматривается участок в осях 27-34/А-Ж сильвинитовой обогатительной фабрики с размерами в осях 42,0х36,0 м; фактический срок эксплуатации: 39 лет; число групп однотипных конструкций несущего каркаса:  $n = 34$ .

Воспользуемся вышеупомянутой методикой [3] на практике и оценим техническое состояние строительных конструкций. Наименование и нумерация групп приведены в табл. 1.

Таблица 1 Наименование и нумерация групп однотипных конструкций

Уровни	Номера и наименование групп однотипных конструкций несущего каркаса объекта
0-уровень (Нул-ой цикл)	0.1 Основание под фундаменты колонн 0.2 Фундаменты под колонны
1-й уровень (отм. +11,680)	1.1 Стены наружные, керамзитобетонные стеновые панели. 1.2 Колонны стальные составные двутаврового сечения. 1.3 Балки перекрытий 1.4 Связи-распорки горизонтальные 1.5 Плиты перекрытий (монолитные ж/б)
2-й уровень (отм. +14,850)	2.1 Стены наружные, керамзитобетонные стеновые панели. 2.2 Колонны стальные составные двутаврового сечения. 2.3 Балки перекрытий 2.4 Настил перекрытий (стальные рифленые листы)
3-й уровень (отм. +29,900)	3.1 Стены наружные, керамзитобетонные стеновые панели. 3.2 Колонны стальные составные двутаврового сечения. 3.3 Балки перекрытий 3.4 Связи-распорки горизонтальные 3.5 Плиты перекрытий (монолитные ж/б) 3.6 Стропильные фермы 3.7 Горизонтальные связи и распорки по верхним поясам ферм 3.8 Горизонтальные связи и распорки по нижним поясам ферм 3.9 Вертикальные связи по фермам 3.10 Балки покрытия 3.11 Балки усиления плит покрытия 3.12 Плиты покрытия (сборные ж/б ребристые) 3.13 Подкрановые балки
4-й уровень (отм. +33,330)	4.1 Стены наружные, керамзитобетонные стеновые панели. 4.2 Колонны стальные составные двутаврового сечения. 4.3 Балки перекрытий 4.4 Связи-распорки горизонтальные 4.5 Плиты перекрытий (монолитные ж/б)
5-й уровень (отм. +40,810)	5.1 Стены наружные, керамзитобетонные стеновые панели. 5.2 Колонны стальные составные двутаврового сечения. 5.3 Балки покрытия 5.4 Связи-распорки горизонтальные 5.5 Плиты покрытия (сборные ж/б ребристые)

*Примечание.* Номера групп однотипных конструкций несущего каркаса здания содержат 2 цифры. Первая из них означает номер уровня здания, вторая – порядковый номер группы на уровне.

По уровням опасности и рангам уровней определены значения надежности наиболее  $p_1$  и наименее  $p_2$  дефектных конструкций, рассчитаны средние уровни надежности  $M_{pi}$  однотипных групп конструкций и результаты формализации занесены в табл. 2.

Таблица 2 Информация о техническом состоянии конструкций несущего каркаса здания и результаты ее формализации

№ гр.	Описание деф-ов «слабой» в группе конструкций	$c_1/p_1$	$c_2/p_2$	$M_p$
0.1	Дефекты не обнаружены	1.2/0.987	1.1/0.994	0.991
0.2	Дефекты не обнаружены	1.2/0.987	1.1/0.994	0.991
1.1	Шелушение пов-ти наружного слоя совместно со слоем краски. Разрушение наружного с оголением арм-ры пространственного каркаса. Гориз-ые трещины с шир-ой раскр. 2 ... 6 мм вдоль арм-ры простр-го каркаса. Верт-е (наклонные) трещины с шир-ой раскр. 2 ... 20 мм. Кор-ый износ арм-ры более 25%. Сетка трещин шир-ой раскр. 1 ... 2 мм в фактурном слое панели. Проседание панели на опоре на величину 5 ... 10 мм. Откл-е панели от верт-ой пл-ти на величину до 30 мм. Отсутствие антикор-ой защиты на пов-ти внутреннего фактурного слоя.	9.3/0.284	3.2/0.828	0.556
1.2	Коррозионный износ 30%, дефекты и повреждения	7.2/0.441	3.3/0.777	0.609
1.3	Коррозионный износ 35%, дефекты и повреждения	7.3/0.414	3.1/0.882	0.648
1.4	Коррозионный износ 55%, дефекты и повреждения, местный погиб полки уголков на величину 20-40 мм длиной 150-400 мм, общая потеря устойчивости элементов	8.2/0.365	4.3/0.644	0.505
1.5	Деф-ты и повр-я, кор-ый износ арматуры 10%	7.1/0.470	3.2/0.828	0.649
2.1	То же, что и для группы 1.1	9.3/0.284	3.2/0.828	0.556
2.2	Коррозионный износ 30%, дефекты и повреждения	7.2/0.441	3.3/0.777	0.609
2.3	Коррозионный износ 35%, дефекты и повреждения	7.2/0.441	2.1/0.969	0.705
2.4	Коррозионный износ 7%	3.1/0.882	1.3/0.981	0.932
3.1	То же, что и для группы 1.1	9.3/0.284	3.2/0.828	0.556
3.2	Коррозионный износ 25%, дефекты и повреждения	7.2/0.441	2.3/0.910	0.676
3.3	Коррозионный износ 25%, дефекты и повреждения	7.2/0.441	2.1/0.969	0.705
3.4	Коррозионный износ 55%, дефекты и повреждения, местный погиб полки уголков на величину 20-40 мм длиной 150-400 мм, общая потеря устойчивости элементов	8.2/0.365	3.3/0.777	0.571
3.5	Деф-ты и повр-я, кор-ый износ арматуры 15%	7.1/0.470	3.1/0.882	0.676
3.6	Коррозионный износ 55%, коррозионный износ болтов крепления 45%, дефекты и повреждения: частичный разрыв узловых швов фасонки и опорного раскоса; местный погиб полки уголка величиной 20 мм; потеря общей устойчивости элементов фермы; отсутствуют соединительные прокладки составного крестового сечения по длине элемента; выгиб элементов фермы из плоскости	9.3/0.284	2.2/0.939	0.612
3.7	Коррозионный износ 20%, дефекты и повреждения, отсутствуют элементы предусмотренные проектом	7.2/0.441	3.1/0.882	0.662
3.8	Коррозионный износ 20%, дефекты и повреждения, отсутствуют элементы предусмотренные проектом	7.2/0.441	3.1/0.882	0.662
3.9	Коррозионный износ 5%, дефекты и повреждения	2.2/0.939	1.3/0.981	0.960
3.10	Коррозионный износ 15%, дефекты и повреждения	5.3/0.533	2.3/0.910	0.722
3.11	Коррозионный износ 25%, дефекты и повреждения	6/0.500	2.2/0.939	0.720
3.12	Кор-ый износ арматуры 45%, дефекты и повр-я	8.2/0.365	3.1/0.882	0.624
3.13	Коррозионный износ 16%, дефекты и повреждения: элементы тормозных конструкций отсутствуют, общая потеря устойчивости элементов тормозных ферм, соединительные	9.2/0.303	3.3/0.777	0.540

	элементы тормозных конструкций обрезаны,			
4.1	То же, что и для группы 1.1	2.3/0.910	2.2/0.939	0.925
4.2	Коррозионный износ 20%, дефекты и повреждения	3.1/0.882	1.3/0.981	0.932
4.3	Коррозионный износ 15%, дефекты и повреждения	1.2/0.987	1.1/0.994	0.991
4.4	Коррозионный износ 45%, дефекты и повреждения, выгиб элемента из плоскости на 60 мм	2.3/0.910	1.3/0.981	0.946
4.5	Деф-ты и повр-я, кор-ый износ арматуры 15%	2.3/0.910	1.3/0.981	0.946
5.1	То же, что и для группы 1.1	2.3/0.910	2.2/0.939	0.925
5.2	Коррозионный износ 20%, дефекты и повреждения	3.2/0.828	2.2/0.939	0.884
5.3	Коррозионный износ 15%, дефекты и повреждения	3.2/0.828	2.3/0.910	0.869
5.4	Коррозионный износ 50%, дефекты и повреждения	2.3/0.910	1.3/0.981	0.946
5.5	Деф-ты и повр-я, кор-ый износ арматуры 10%	1.2/0.987	1.1/0.994	0.991

Примечание.  $c_1$  – уровень опасности наиболее дефектной конструкции в группе;  $c_2$  – уровень опасности наименее дефектной конструкции в группе;  $p_1$  – значение уровня надежности наиболее дефектной конструкции;  $p_2$  – значение уровня надежности наименее дефектной конструкции;  $M_p$  – средний уровень надежности конструкций группы.

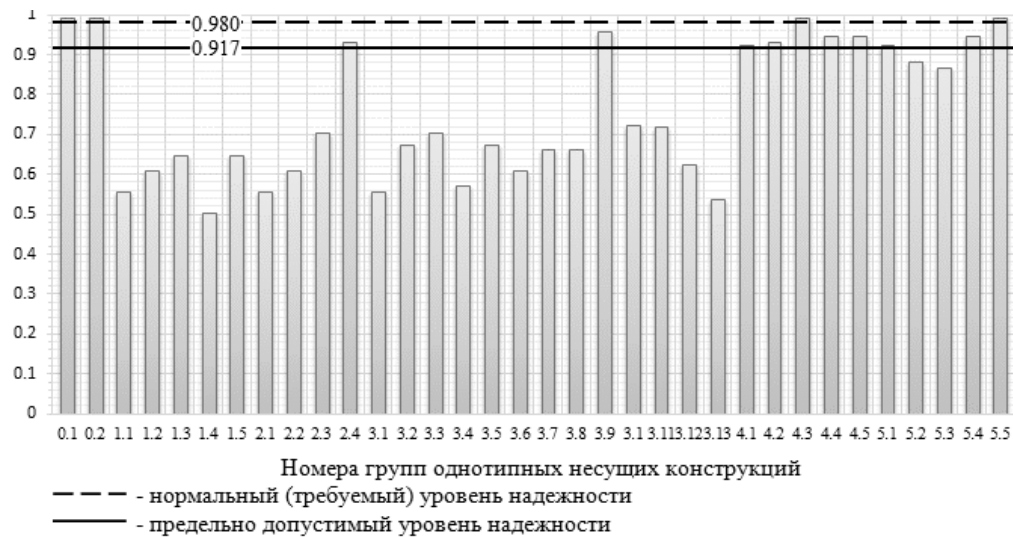


Рисунок 1 - Диаграмма средних уровней надежности групп однотипных конструкций несущего каркаса здания сальвинитовой обогатительной фабрики

По данным табл. 2 построена диаграмма средних уровней надежности групп однотипных конструкций несущего каркаса здания, рассчитаны значения риска аварии для каждого «промежуточного» здания, которые можно выделить из исследуемого объекта. Диаграмма средних уровней надежности конструкций в однотипных группах несущего каркаса здания сальвинитовой обогатительной фабрики приведена на рис. 1. Для сравнения на диаграмме показаны стандартные уровни надежности несущих конструкций ( $p_n$  и  $p_{нд}$ ), позволяющие визуально удостовериться в том, как отличается фактическое техническое состояние объекта от состояния, предусмотренного проектом.

Таблица 3 Значения риска аварии для «промежуточных» зданий

«Промежуточные» здания	Вычисление величины риска аварии	Расч-ый риск
0-й уровень (нул-ой цикл)	$1/\Pi(p_i)_0 = 1/(0.991 \cdot 0.991) = 1.0$	$(R)_0 = 1.0$
0-й уровень + 1-й уровень	$1/\Pi(p_i)_0 \cdot 1/\Pi(p_i)_1 = 1.018 \cdot 1/(0.556 \cdot 0.609 \cdot 0.648 \cdot 0.505 \cdot 0.649) = 14.2$	$(R)_1 = 14.2$
0-й уровень + 1-й уровень + 2-й уровень	$1/\Pi(p_i)_0 \cdot 1/\Pi(p_i)_1 \cdot 1/\Pi(p_i)_2 = 14.156 \cdot 1/(0.556 \cdot 0.609 \cdot 0.705 \cdot 0.932) = 63.6$	$(R)_2 = 63.6$
0-й уровень + 1-й уровень + 2-й уровень + 3-й уровень	$1/\Pi(p_i)_0 \cdot 1/\Pi(p_i)_1 \cdot 1/\Pi(p_i)_2 \cdot 1/\Pi(p_i)_3 = 63.627 \cdot 1/(0.556 \cdot 0.676 \cdot 0.705 \cdot 0.571 \cdot 0.676 \cdot 0.612 \cdot 0.662 \cdot 0.662 \cdot 0.960 \cdot 0.722 \cdot 0.720 \cdot 0.624 \cdot 0.540) = 13793.1$	$(R)_3 = 13793.1$
0-й уровень + 1-й уровень + 2-й уровень + 3-й уровень + 4-й уровень	$1/\Pi(p_i)_0 \cdot 1/\Pi(p_i)_1 \cdot 1/\Pi(p_i)_2 \cdot 1/\Pi(p_i)_3 \cdot 1/\Pi(p_i)_4 = 13793.083 \cdot 1/(0.925 \cdot 0.932 \cdot 0.991 \cdot 0.946 \cdot 0.946) = 18040.5$	$(R)_4 = 18040.5$
0-й уровень + 1-й уровень + 2-й уровень + 3-й уровень + 4-й уровень + 5-й уровень	$1/\Pi(p_i)_0 \cdot 1/\Pi(p_i)_1 \cdot 1/\Pi(p_i)_2 \cdot 1/\Pi(p_i)_3 \cdot 1/\Pi(p_i)_4 \cdot 1/\Pi(p_i)_5 = 18040.467 \cdot 1/(0.925 \cdot 0.884 \cdot 0.869 \cdot 0.946 \cdot 0.991) = 27081.3$	$(R)_5 = 27081.3$

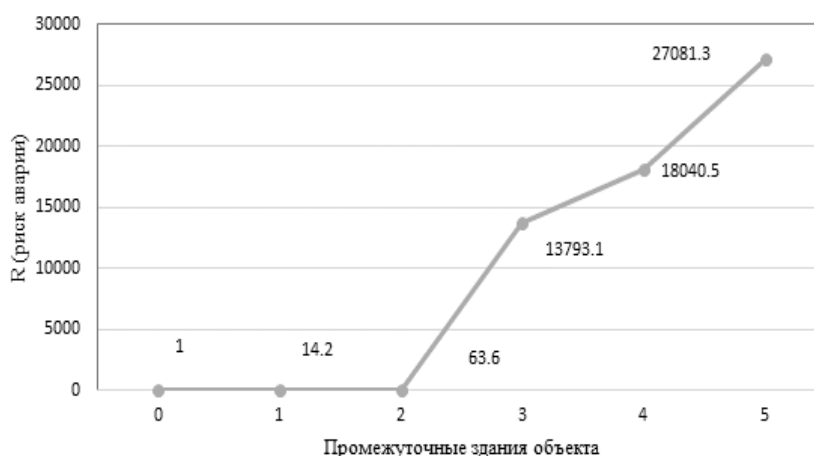


Рисунок 2 - Карта риска здания сальвинитовой обогатительной фабрики

Таким образом здание сальвинитовой обогатительной фабрики согласно методики [3] находится в аварийном состоянии. Работы по усилению, ремонту, восстановлению несущих конструкций, замене дефектных конструкций должны быть начаты немедленно.

Обследование было выполнено в период ноябрь 2015 – январь 2016. Ему предшествовало обрушение галереи конвейера дробления и водовода, которая непосредственно и примыкала к исследуемому объекту. Если предположить, что проектная вероятность наступления неблагоприятного состояния (разрушения) была на уровне  $10^{-6}$ , то в процессе эксплуатации вероятность аварии достигла значения  $27081 \cdot 10^{-6} = 2,7 \cdot 10^{-2}$ , что значительно больше уровня недопустимого риска  $10^{-4}$ .

Выполним оценку риска аварии альтернативной методикой полуколичественной оценки риска и используя экспертные оценки согласно методике [5]. Результаты оценки риска аварии сведены в табл. 4.

Таблица 4 Оценка надежности силвинитовой обогатительной фабрики

№	Условие надежности	Удельный вес условия	Оценка в баллах					Удельная надежность	Обоснование принятого решения
			1	2	3	4	5		
1	Соответствие расчетной модели сооружения и нагрузок действительной работе	0,05				4		0,2	Имелся опыт строительства аналогичных сооружений
2	Апробированность конструктивного решения	0,03					5	0,15	
3	Учет требований нормативных документов	0,05				4		0,2	Типовой проект
4	Квалификация проектировщиков, наличие достаточного времени и средств на проектирование	0,03					5	0,15	
Качество строительства									
5	Соответствие материалов и конструкций проекту	0,05				4		0,2	Полное соответствие
6	Качество строительно-монтажных работ	0,05				4		0,2	Хорошее
7	Апробированность методов строительства	0,03					5	0,15	Организация имела опыт строительства подобных объектов
8	Контроль качества строительства	0,05				4		0,2	Качество проверялось регулярно
9	Квалификация кадров	0,04					5	0,2	Строительство велось квалифицированными кадрами
10	Достаточность времени и средств на строительство	0,05				4		0,2	
11	Отсутствие отступлений от норм и проекта	0,05				4		0,2	Отступления от норм и проекта были незначительными
Качество эксплуатации									
12	Отсутствие завышения проектных нагрузок	0,01					5	0,05	Завышения проектных нагрузок отсутствовали
13	Контроль за исправностью сооружения и оборудования	0,01					5	0,05	Регулярный контроль
14	Соблюдение правил эксплуатации	0,5	1					0,5	Проводилась эксплуатация с опасными повреждениями
		$\Sigma = 1$						$P = 2,65$	

1 – неприемлемо, 2 – неудовлетворительно, 3 – удовлетворительно, 4- хорошо, 5 – отлично.

В соответствии с [5] условная надежность силвинитовой обогатительной фабрики составляет  $\beta = 0,53$ , что соответствует риску аварии

$4,15 \cdot 10^{-4}$ , что снова свидетельствует о неудовлетворительной надежности здания.

Продемонстрируем применение методики [3] для повторной оценки технического состояния здания по итогам выполненных работ по усилению, ремонту и замене конструкций. Результаты последующей оценки технического состояния групп однотипных конструкций несущего каркаса здания сальвинитовой обогатительной фабрики показали удовлетворительное состояние конструкций и отсутствие дефектов. Уровни опасности конструкций в наиболее дефектных группах не превысили показателя в 3.1, а в наименее дефектных 2.2. На рисунке 3 представлена карта риска для здания сальвинитовой обогатительной фабрики после ремонта.

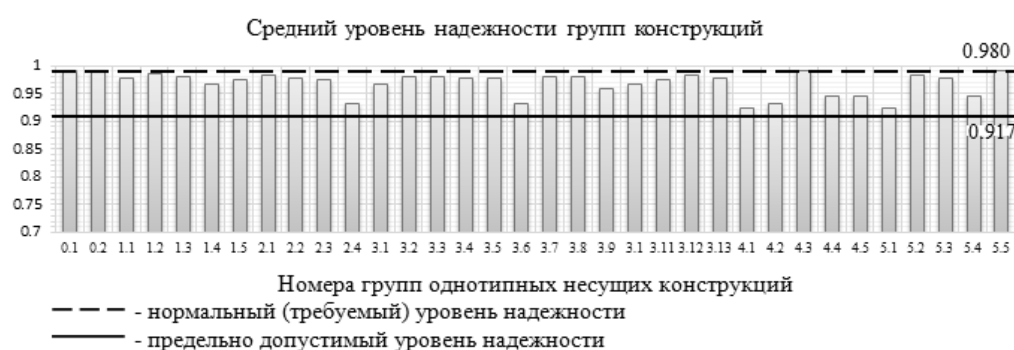


Рисунок 3 - Диаграмма средних уровней надежности групп однотипных конструкций несущего каркаса здания сальвинитовой обогатительной фабрики после ремонта, усиления и замены конструкций

Очевидно, что результатом мероприятий по усилению, ремонту, восстановлению несущих конструкций и замене дефектных конструкций стало улучшение общего технического состояния всего здания сальвинитовой обогатительной фабрики в целом; теперь здание находится в безопасном состоянии. Предельно допустимый уровень надежности конструкций превышен не был.

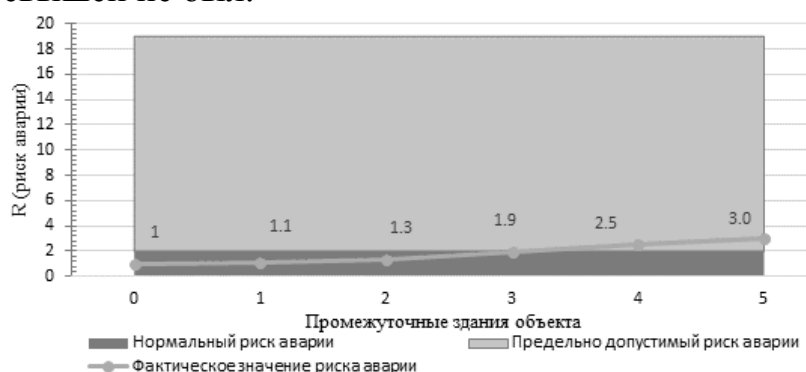


Рисунок 4 - Карта риска здания сальвинитовой обогатительной фабрики

Методика оценки рисков на основе лингвистической переменной «очень» [3] является ярким представителем системы полуколичественной оценки вероятности аварии зданий, сооружений и их конструктивных элементов. К положительным сторонам методики стоит отнести

относительно невысокую трудоемкость работ, возможность выполнения оценки в сжатые сроки, что способствует быстрому получению результатов о техническом состоянии объекта и принятию решений о его дальнейшей эксплуатации. Методика позволяет учесть техническое состояние всех обследуемых элементов конструкций, а предложенная градация уровней опасности дефектных конструкций точно приводит им в соответствие уровни надежности конструкций.

Методика определения вероятности аварии на основании анализа условий, влияющих на надежность сооружений, используя экспертные оценки [5] является наиболее подходящей для получения быстрых сведений о техническом состоянии предмета обследования и вероятности аварии в будущем. Среди преимуществ методики можно выделить скорость, отсутствие необходимости в доскональном обследовании объекта, возможность учета качества проектирования и строительства в процессе оценки риска.

Анализ практического применения полуколичественных методик оценки риска показал, что результаты в приведенных методиках сильно зависят от квалификации и профессионального опыта эксперта, субъективного мнения людей, связанных с конкретным измеряемым параметром (например, влияние дефекта на надежность конструкции), что в свою очередь может привести к противоречивым, неправильным или несоответствующим результатам.

Теоретический и практический интерес представляет анализ рисков количественными методами и сравнение результатов с полуколичественными методами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО 2394-2016 Конструкции строительные. Основные принципы надежности. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 66с.
2. ГОСТ Р 51897-2011/Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2011. – 19с..
3. Мельчаков А.П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов (Теория, методики и инженерные приложения). – Челябинск: издательство ЮУрГУ, 2006. – 49 с.
4. ГОСТ Р ИСО 13824-2013 Практические аспекты менеджмента риска. Общие принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 40с.
5. Отчет по выполнению подраздела мероприятий по социальному обслуживанию населения в части предоставления образовательных услуг жителям города Москвы. Подраздел №11.5.3.2. «Современные методы исследований и проектной оценки рисков аварий зданий и сооружений». – Москва: ассоциация московских вузов, НИИ МГСУ, 2009. – 25 с.