

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Изложен комплексный подход к оценке рисков при реконструкции зданий, заключающийся в качественном и количественном анализе. В рамках количественного анализа предложены методики вероятностной оценки рисков реконструируемых зданий по критериям неравномерных осадок и прочности стен здания.

Ключевые слова: *вероятностная оценка, случайная величина, статистические параметры, плотность распределения, напряженно-деформированное состояние, реконструируемое здание.*

ОЦІНКА РИЗИКІВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ

Викладено комплексний підхід до оцінювання ризиків при реконструкції будівель, що полягає у якісному та кількісному аналізі. У рамках кількісного аналізу запропоновано методики ймовірнісного оцінювання ризиків будівель, що реконструюються, за критеріями нерівномірних осідань та міцності стін будівлі.

Ключові слова: *імовірнісна оцінка, випадкова величина, статистичні параметри, щільність розподілу, напружено-деформований стан, будівля, що реконструюється.*

RISK ASSESSMENT FOR THE RECONSTRUCTION OF BUILDINGS

The article describes a complex approach to risk assessment for the reconstruction of the buildings of deposits, which consists in qualitative and quantitative analysis. In the framework of the quantities of development of the method of probabilistic risk assessment of the reconstructed buildings on the criteria of non-uniform deformation and strength of the walls of the building

Keywords: *probabilistic assessment, random variables, statistical parameters, probability density function, stress-deformed state, the reconstructed building.*

Введение. Проблема оценки рисков при реконструкции зданий имеет большое значение, т.к. масштабы реконструкции постоянно увеличиваются. Сюда относятся надстройка и перепланировка помещений существующих зданий (зачастую исторических), пристройка к зданиям, изменение назначения здания и т.п. Все эти факторы меняют расчетную схему здания, изменяются вид и величина нагрузок на конструкции и основание. Эти изменения накладываются на уже существующее напряженно-деформированное состояние здания, зачастую эксплуатирующееся не один десяток лет.

Обзор последних исследований и публикаций. ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій і основ» определяет понятие «риск» как количественную характеристику возможных потерь, причиненных случайными непредвиденными событиями, которые вызывают

частичное или полное разрушение сооружения. Также риск оценивается по вероятности появления опасного события и тяжести его последствий.

На каждой стадии жизненного цикла объекта (здания) следует оценить величину и характер риска. Общая последовательность оценки рисков при реконструкции зданий и сооружений может быть изложена так (рис. 1).

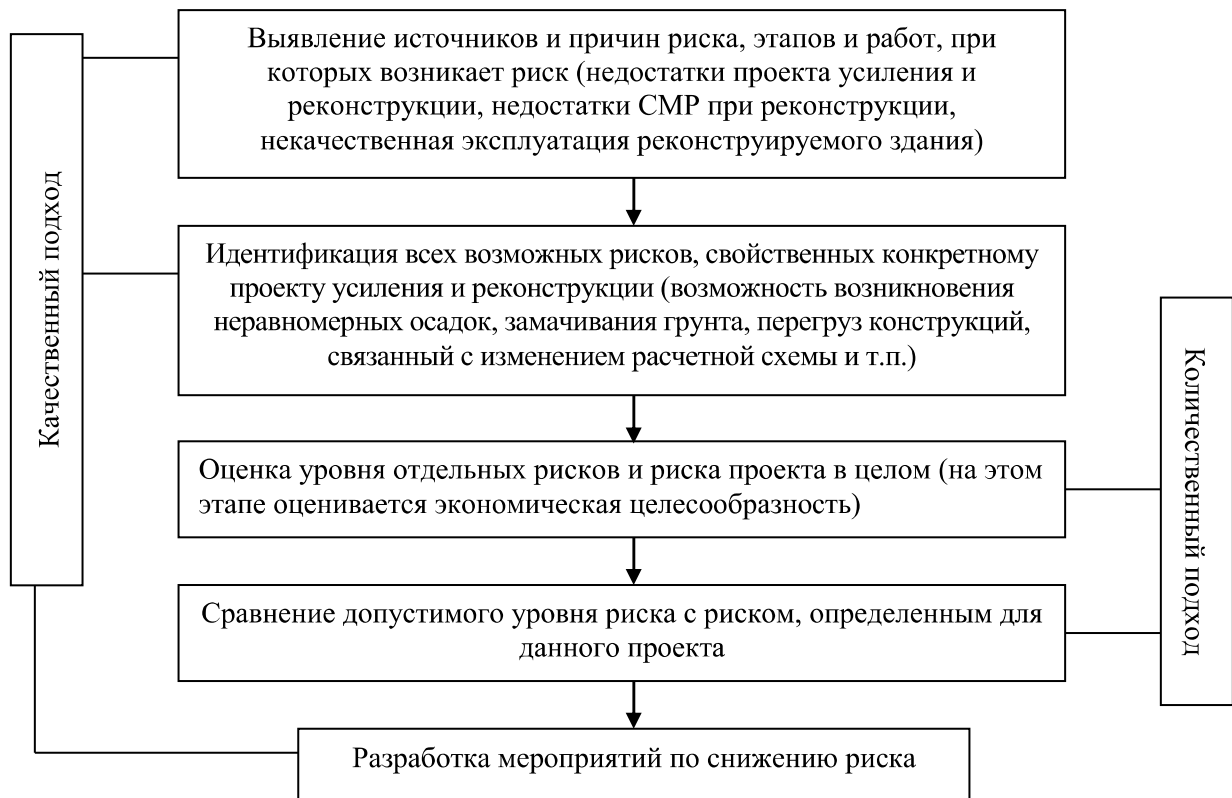


Рис. 1. Последовательность оценки рисков при реконструкции зданий

Оценка риска может быть выполнена с помощью качественного и количественного подходов. При качественной оценке имеет место всесторонний анализ, выявляющий и идентифицирующий возможные виды рисков, свойственных проекту. В данном анализе изложена стоимостная составляющая реализации рисков и предложены мероприятия по минимизации последствий риска.

При разработке мероприятий по снижению рисков в условиях реконструкции зданий большую роль играет приобретение дополнительной информации, которая может быть получена с помощью научных исследований по обеспечению надежности сооружений [6 – 8].

Качественный анализ в условиях реконструкции – это изучение информации о состоянии конструкций и основания здания (визуальное и инструментальное обследование), существующих режимах эксплуатации, получение данных о ремонтах и реконструкциях, а также о нагрузках и воздействиях. Результаты качественного анализа служат исходными данными для анализа количественного. Наиболее распространенными количественными методами для оценки надежности зданий и сооружений

являются следующие: метод численного интегрирования, метод статистических испытаний (Монте-Карло), метод статистической линеаризации, метод РЕМ (Point Estimate Method) [3 – 5]. В последнее время для целей реконструкции возможно применение метода количественной оценки риска QRA (Quantitative Risk Assessment) [9]. К вероятностным количественным методам анализа риска относится метод «анализа деревьев отказов и неисправностей» (FTA) [10 – 12].

Таким образом, оценка рисков при реконструкции зданий состоит из взаимодополняющих качественных и количественных оценок имеющихся рисков.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В настоящее время, согласно требованиям нормативных документов, действующим в Украине, расчет строительных конструкций и оснований выполняется по методу предельных состояний. В соответствии с ними, воздействие на здание представляется в виде неких усредненных (зачастую максимальных) детерминированных значений. Влияние возможной изменчивости этих значений учитывается опосредованно – введением различных коэффициентов. На самом же деле, факторы, влияющие на НДС системы «основание – фундамент – сооружение» (ОФС) являются случайными величинами: нагрузки и воздействия, прочность и деформативность строительных конструкций и оснований. Что касается зданий и сооружений, имеющих возраст в несколько десятков лет, разброс значений факторов прочности и деформативности конструкций и оснований значительно больше. Таким образом, для реконструируемых зданий может быть выполнена оценка рисков путем сочетания качественных и количественных методов.

Постановка задачи. В процессе осуществления данного исследования была выполнена оценка рисков для здания районной библиотеки в г. Дергачи, построенного 40 лет назад (рис. 2).



Рис. 2. Главный фасад здания библиотеки

Основной материал и результаты. В рамках качественной оценки риска было выполнено визуальное и инструментальное обследование здания библиотеки. Двухэтажное здание в плане имеет прямоугольную форму с размерами 25,2 x 11,2 м и высотой $\approx 8,0$ м, высота этажа – 3,3 м. Конструктивная схема – несущие продольные кирпичные стены с опирающимися на них железобетонными плитами перекрытия. Стены выполнены в основном из силикатного кирпича, карниз и цоколь – из глиняного, толщина наружных стен – 510 мм, внутренней продольной стены и стен лестничной клетки – 380 мм. Фундаменты ленточные, из бутовой кладки. Глубина заложения подошвы фундаментов – от -2,6 м до -3,6 м (рис. 3).

В геоморфологическом отношении участок расположен в пределах пойменной террасы р. Лопань. Местоположение участка является не благоприятным, т.к. в паводковые периоды уровень грунтовых вод (УГВ) может достигать поверхности земли в пойме и она затопливается. На данном участке выделены шесть инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (табл. 1): ИГЭ-1 – насыпной слой мощностью 0,6 – 1,2 м; ИГЭ-2 – суглинок гумусированный, тугопластичный, залегает под ИГЭ-1 на глубине 0,6 – 1,8 м; ИГЭ-3 – супесь твердая, вскрыта в интервале глубин 1,2 – 2,2 м; ИГЭ-4 – супесь пластичная, вскрыта на глубинах 1,8 – 2,7 м; ИГЭ-5 – супесь пестрая пластичная, встречена на глубине 2,2 м и залегает до разведанной глубины 2,7 м; ИГЭ-6 – супесь пластичная, залегает под супесью ИГЭ-4 от глубины 2,7 м до разведанной глубины 3,7 м. Грунтовые воды встречены на глубине 2,7 м. Инженерно-геологический разрез с отметкой подошвы фундаментов показан на рис. 4.

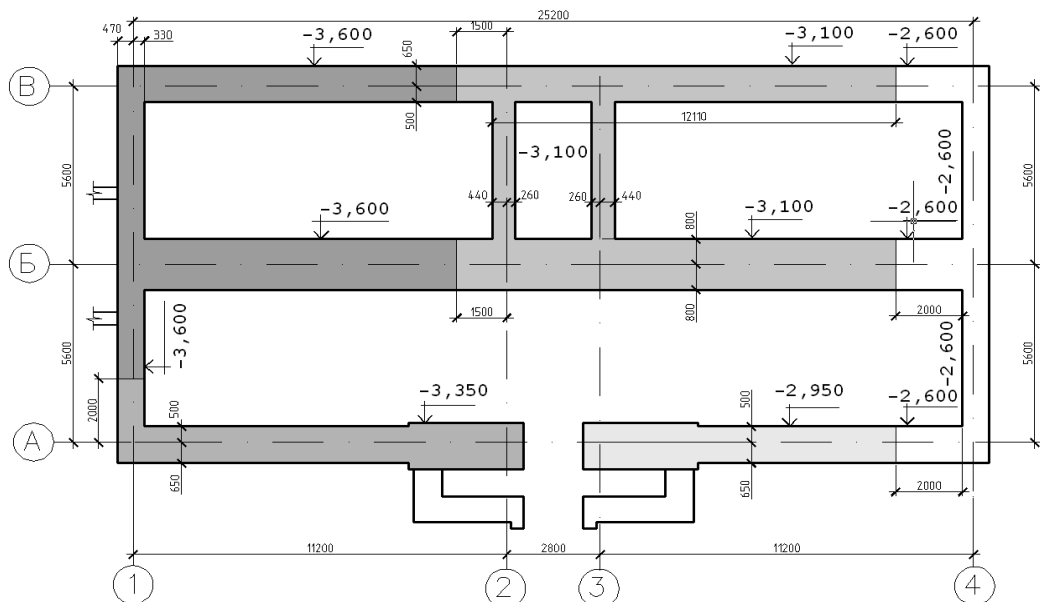
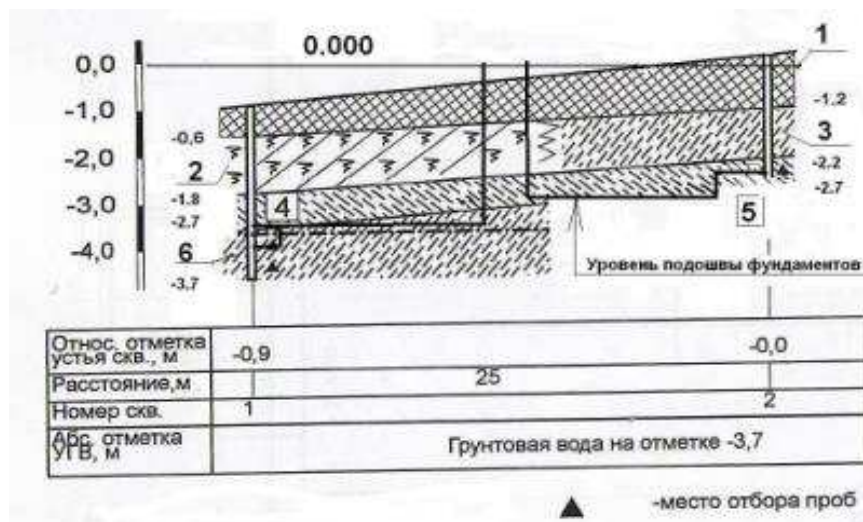


Рис. 3. Схема расположения фундаментов (более темным цветом показаны участки с большим заглублением фундамента)

Таблица 1. Характеристики свойств грунтов

Наименование характеристик, обозначений, единицы изм.	Инженерно-геологический элемент					
	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6
Плотность грунта ρ , г/см ³	1,53	1,65	1,72	1,77	1,80	1,82
Удельное сцепление c , кПа				11	12	10
Угол внутр. трения ϕ , град				21	22	20
Влажность природ. w , д.ед.				0,14	0,12	0,16
Коэфф. пористости e , д.ед.				0,75	0,82	0,69
Показ. текучести I_L , д.ед.				0,29		0,43
Модуль деформации, МПа				10	8	13

Кирпичная кладка стен имеет многочисленные трещины с наружной и внутренней сторон стен шириной раскрытия от 0,5 до 15 мм, в том числе и сквозные. Особенно неудовлетворительное состояние кирпичной кладки стен фасадов «1» – «4» и «4» – «1» (рис. 5, 6). Также были зафиксированы трещины и во внутренней несущей стене и стенах лестничной клетки, большинство из которых приурочено ко второму этажу; расстояние между плитами покрытия достигает 15 мм. Разрушение кирпичной кладки зафиксировано в местах расположения водосточных труб, а также в кладке цоколя и карниза.



*Рис. 4. Инженерно-геологический разрез вдоль ряда А (оси 1-4):
 1 – насыпные грунты; 2 – суглинок тугопластичный, гумусированный;
 3 – супесь твердая, гумусированная; 4 – супесь пластичная;
 5 – супесь пестрая пластичная; 6 – супесь зеленоватая пластичная*

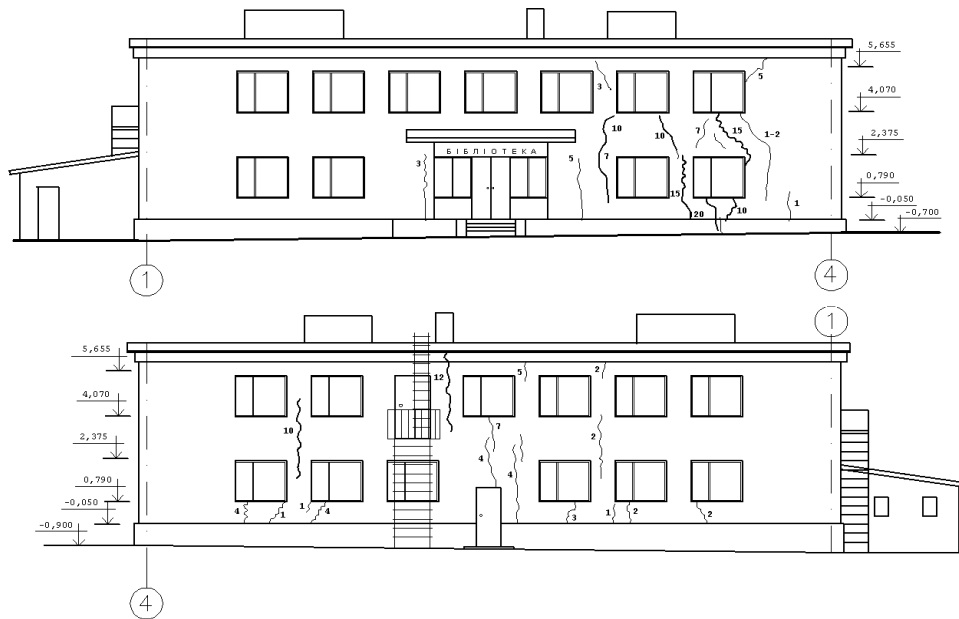


Рис. 5. Деформационные схемы по фасадам в осях: а) «1» – «4», б) «4» – «1»



Рис. 6. Деформации в кирпичной кладке главного фасада здания библиотеки: а) участок стены; б) простенок

Анализ причин деформаций здания. Качественный анализ.

1. Низкое качество грунтов основания и высокий уровень грунтовых вод. Основанием под фундаменты служат два типа грунтов: 1) грунты ИГЭ-5 – супесь пластичная, влажная, средней плотности; 2) ИГЭ-6 – супесь пластичная, высокой влажности, низкой плотности. Супесь с прослойками суглинка мягкопластичного и мелкого песка, насыщенного водой. Грунтовые воды – на глубине 2,7 м от поверхности земли.

2. Различная глубина заложения фундаментов здания, изменяющаяся с -2,6 до -3,6 м, причем по оси «А» (участок главного входа) имеется разрыв фундаментной ленты. Таким образом, часть фундаментов опирается на

грунты ИГЭ-5 с модулем деформации $E = 13$ МПа, часть – на ИГЭ-6 с $E = 8$ МПа. Различные характеристики основания, а также высокий сезонный уровень подземных вод явились причиной неравномерных осадок здания. Немаловажную роль в увеличении неравномерных осадок здания сыграла и практически полностью разрушенная отмостка, не препятствующая проникновению атмосферных вод под подошву фундаментов.

3. Низкое качество кирпичной кладки – в результате испытаний раствора, взятого из швов здания, обнаружено, что его прочность составляет 1 кгс/см^2 . Отчасти положение спасала облицовка наружных стен – керамическая плитка на цементно-песчаном растворе удовлетворительного качества – она удерживала кладку от большего раскрытия трещин. После удаления облицовки динамика раскрытия трещин увеличилась.

Таким образом, в результате качественного анализа было установлено, что возможные риски для данного объекта заключаются в неравномерной осадке здания и разрушении кладки здания.

Количественный анализ. При оценке надежности зданий как механических систем следует придерживаться следующего алгоритма:

1. Выбор расчетной схемы здания, корректное построение математической модели; аппроксимация внешних воздействий и свойств строительных материалов и изделий и их вероятностное описание.

2. Нахождение вероятностных характеристик параметров, определяющих поведение системы при случайных воздействиях.

3. Определение параметров, характеризующих качество системы, и нахождение допустимой области, в которой параметры качества должны сохраняться в установленных пределах.

4. Осуществление показателей надежности и долговечности.

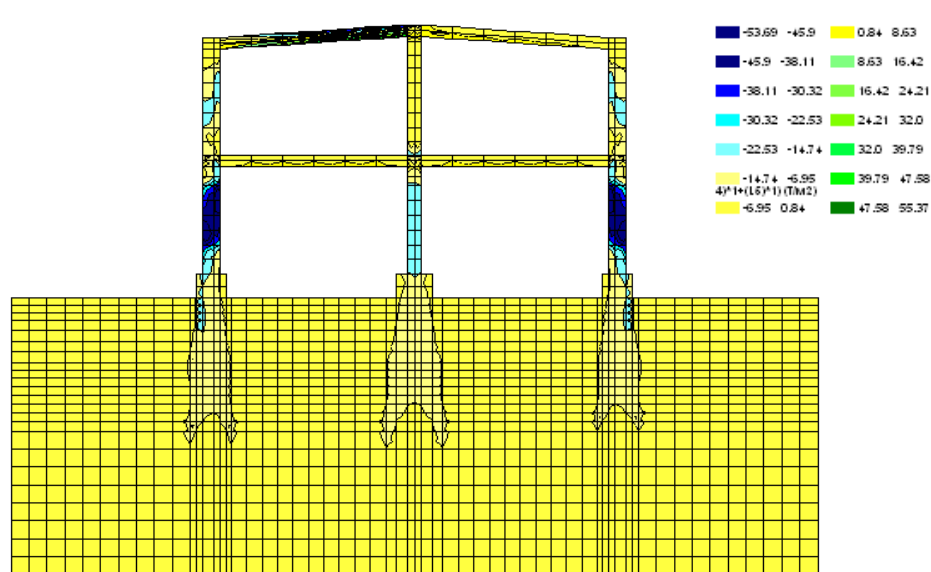


Рис. 7. Расчетная схема поперечника здания и уровень напряжений в элементах

Для определения уровня напряжений и деформаций была рассмотрена конечноэлементная модель поперечника здания. Модель была представлена плоскими четырехугольными конечными элементами, работающими в условиях плоской деформации. При этом учитывалась работа всей системы «основание – фундамент – здание» в единой расчетной схеме. Разбивка на конечные элементы расчетной схемы показана на рис. 6, на котором представлены также напряжения N_z всей системы (т/м^2).

Жесткостные параметры и нагрузки были заданы в соответствии с результатами обследования и нормами проектирования. В численном анализе изменялись два параметра: 1) модули деформации грунта под разными отсеками здания, коэффициент вариации в обоих случаях принят $\nu = 25\%$; 2) модуль упругости кладки для силикатного кирпича стен здания, коэффициент вариации принят $\nu = 17\%$. По результатам испытаний материалов кладки здания методом разрушающего контроля выяснено, что прочность кирпича стен соответствует марке М75, а раствора 0,1 МПа (1 кгс/см^2). В существующем здании, как видно из рис. 5 и 6, встречаются как неповрежденные участки стен, так и участки стен, имеющие трещины различной длины, глубины и ширины раскрытия, т.е. при расчете следует учесть изменение прочности как кирпича, так и раствора. Значения снеговой, ветровой, временной и нагрузки от собственного веса конструкций приняты детерминированными, в соответствии с действующими нормами.

1. Алгоритм вероятностной оценки неравномерности осадок здания.

1.1. Формирование исходных данных.

Согласно данным работы [1], любой закон распределения может быть разложен в ряд по функции нормального распределения и ее производных, если для разлагаемого закона найдены математическое ожидание, дисперсия и другие характеристики распределения. В связи с этим принято, что значения величины модулей деформации грунтов E_1 и E_2 распределены по нормальному закону, определены значения математических ожиданий m_{E1} , m_{E2} и стандартов σ_{E1} , σ_{E2} (рис. 8).

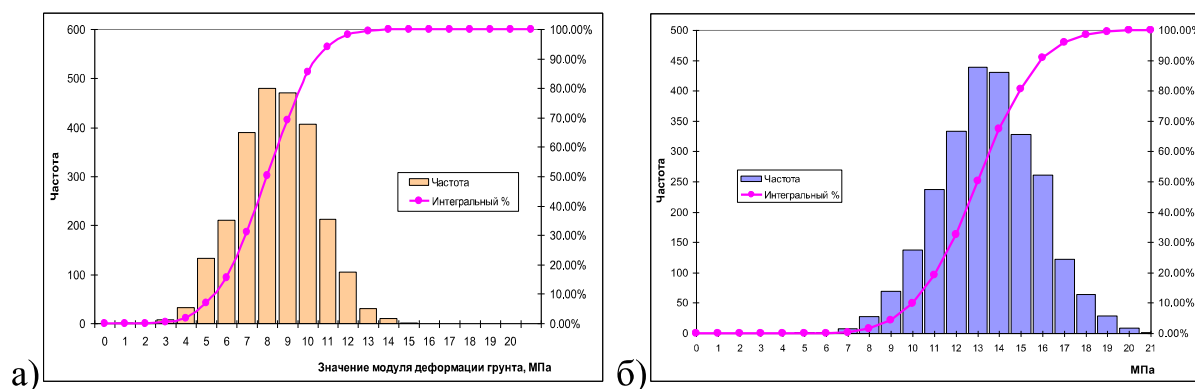


Рис. 8. Гистограмма и интегральная кривая распределения СВ модуля деформации грунта основания E : а) для ИГЭ-6 с $E_1 = 8 \text{ МПа}$; б) для ИГЭ-5 с $E_2 = 13 \text{ МПа}$

Осадка основания есть функция от модуля деформации, тогда осадка основания с модулем деформации E_1 равна $S_1 = A_1/E_1$, осадка с модулем деформации E_2 равна $S_2 = A_2/E_2$, параметры A_1 и A_2 приняты детерминированными величинами, вычисленными предварительно.

1.2. Выполняется n статистических испытаний. Для каждого испытания:

- задаются случайной вероятностью p_1 1-го модуля деформации в пределах от 0 до 1;
- по значению p_1 определяется значение E_1 ;
- задаются случайной вероятностью p_2 2-го модуля деформации в пределах от 0 до 1;
- по значению p_2 определяется значение E_2 ;
- вычисляется значение $S_1 = A_1/E_1$;
- определяется значение $S_2 = A_2/E_2$;
- находится значение неравномерной осадки $i = (S_1 - S_2)/L$, где L – расстояние между отсеками здания, равное в нашем случае 11,4 м.

1.3. Находится вероятность превышения $i > i_u$ как отношение числа испытаний, при которых $i > i_u$, к полному числу испытаний.

В данном исследовании только одно значение крена из 5000 превышало допустимую величину, которая для данного типа зданий равно 0,002, таким образом, вероятность превышения нормативного значения составляет $i = 1/5000 = 2 \times 10^{-4}$.

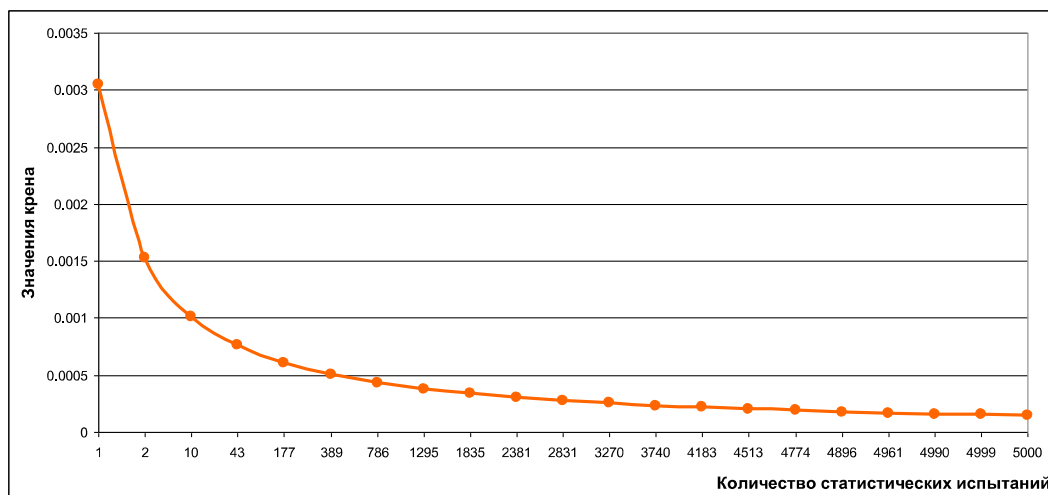


Рис. 9. Распределение значений крена в статистических испытаниях

2. Алгоритм вероятностной оценки прочности кирпичных стен здания.

2.1. Исходные данные. Принято, что значения случайной величины (СВ) расчетного сопротивления кладки сжатию f_d распределены по нормальному закону, определено значение математического ожидания m_{fd} и стандарта σ_{fd} . Также исходным значением является значение вертикальных напряжений, вычисленное с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и являющееся детерминированной величиной.

Возможность применимости нормального распределения для материалов кирпичной кладки может быть обоснована следующими соображениями. В результате испытания образцов кирпича, раствора и кладки здания получены значения, которые удовлетворительно описываются кривой нормального распределения (рис. 10, 11). Кривая распределения прочности кирпичной кладки показана на рис. 12.

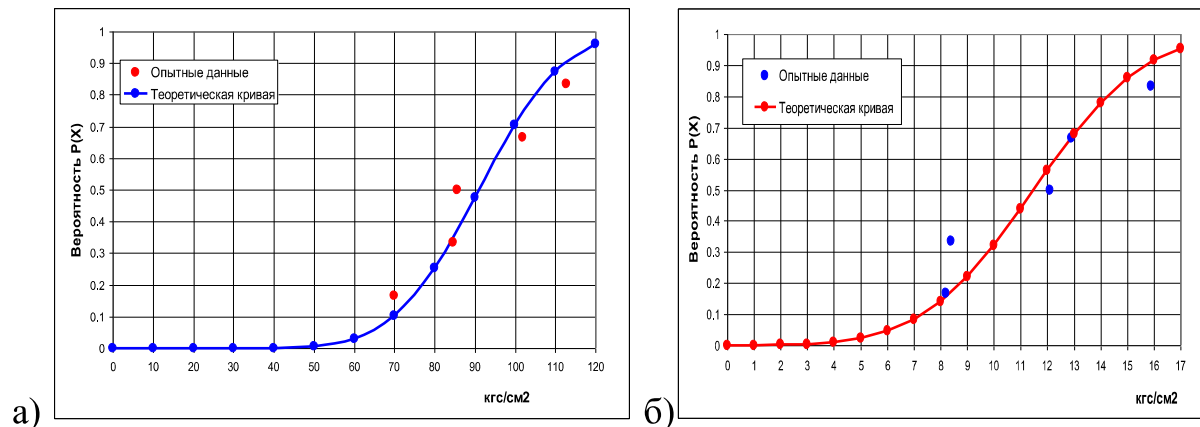


Рис. 10. Сопоставление опытных данных и теоретической кривой распределения при испытании кирпича: а) на сжатие; б) на изгиб

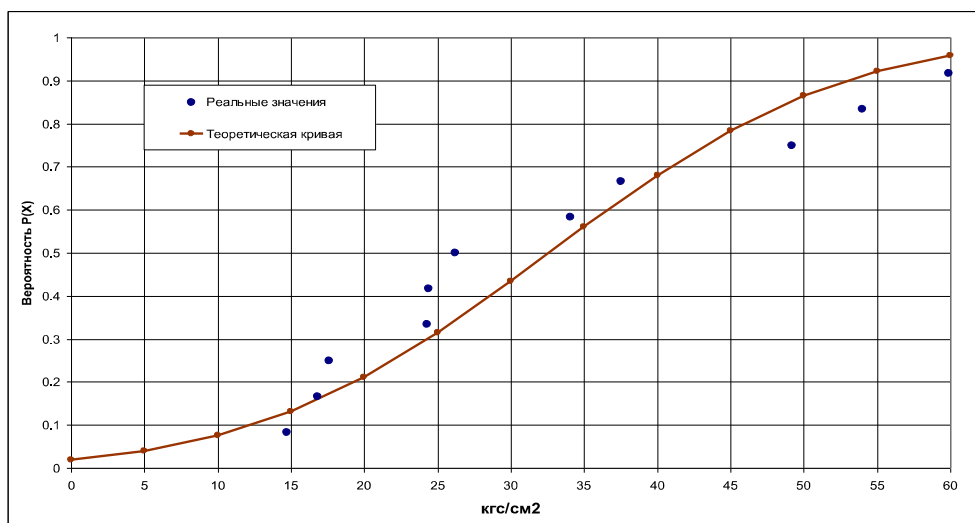


Рис. 11. Сопоставление опытных данных и теоретической кривой распределения при испытании раствора на сжатие, взятого из кладки швов

2.2. Выполняется n статистических испытаний. В каждом испытании задаются случайной вероятностью расчетного сопротивления кладки сжатию в пределах от 0 до 1 $p(f_d)$.

Зная значение напряжений, полученных в результате расчета, находится значение вероятности попадания данной величины в область распределения (рис. 13).

В данном случае вероятность превышения уровня напряжений над прочностью кладки или вероятность отказа составляет $p = 0,01619$ или $1,6 \times 10^{-2}$.

По А.Р. Ржаницыну [2], задача расчета конструкций на безопасность может быть сформулирована в виде требования о выполнении неравенства

$$R - F > 0, \quad (1)$$

где R – обобщенная несущая способность;
 F – обобщенное силовое воздействие.

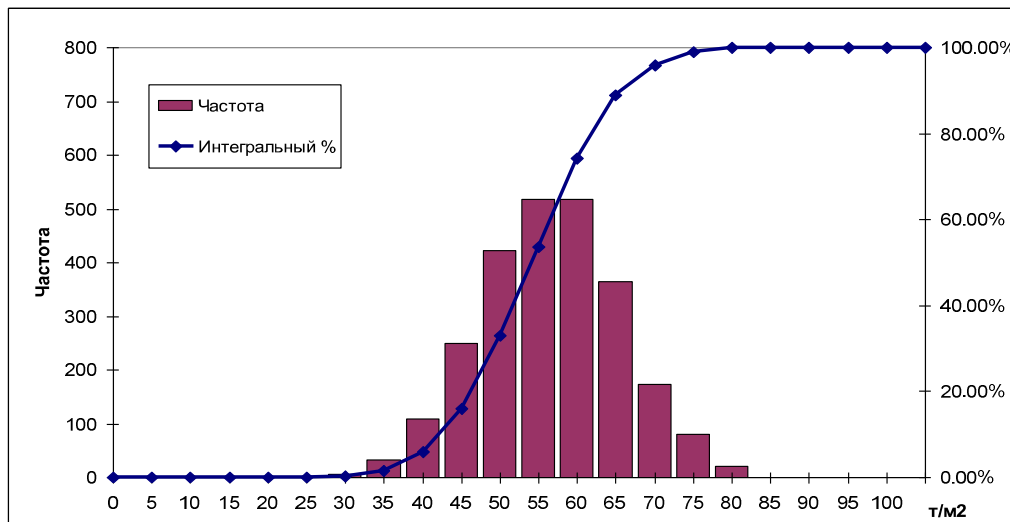


Рис. 12. Гистограмма и интегральная кривая распределения прочности кирпичной кладки

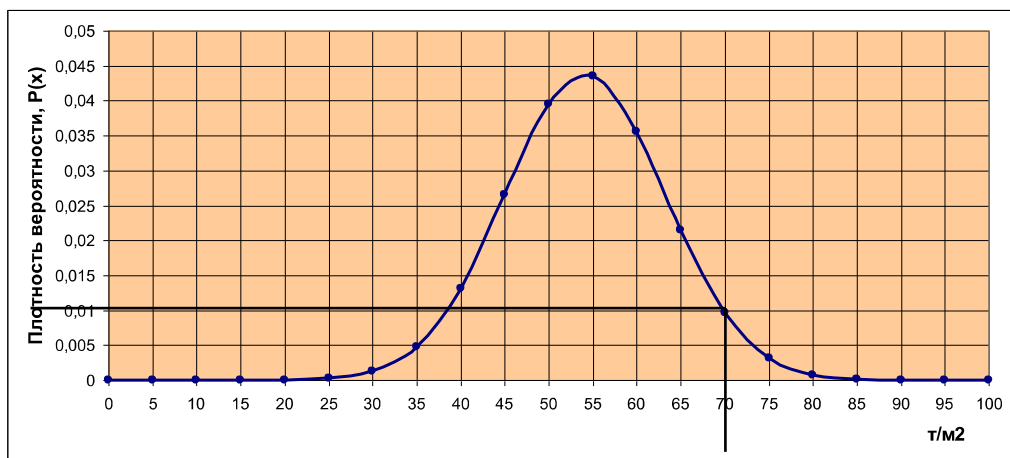


Рис. 13. Плотность вероятности распределения прочности кирпичной кладки

Вероятность неравенства (1) представляет собой вероятность неразрушения конструкции. Для определения значения риска (вероятности) достижения предельного состояния P_u А.Р. Ржаницын получил следующую формулу

$$P_u = \int_{-\infty}^{\infty} p_F(x) \cdot P_R(x) dx = 1 - p_R(x) \cdot P_F(x) dx, \quad (2)$$

где $P_R(x)$ и $p_R(x)$ – функция распределения и функция плотности вероятности обобщенной несущей способности; $P_F(x)$ и $p_F(x)$ – функция распределения и функция плотности вероятности обобщенного силового воздействия.

В случае, когда распределения обобщенной несущей способности R и обобщенного силового воздействия F являются близкими к нормальным, то нормальное распределение величины характеризуется математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ . В таком случае значение риска (вероятности) достижения предельного состояния P_u может быть найдено по формуле

$$P_u = 1 - \Phi(z), \quad (3)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – интеграл вероятностей (функция

Лапласа), определяемый по специальным таблицам; z – характеристика безопасности, равная

$$z = \frac{m_R - m_F}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_F^2}}, \quad (4)$$

где m_R, m_F – математическое ожидание факторов R и F соответственно; σ_R, σ_F – среднеквадратическое отклонение факторов R и F соответственно.

Во-первых, сравнивались значения осадок в поперечных сечениях здания, отстоящих друг от друга на 11,4 м; как было сказано выше, две части здания (в осях 1 – 2 и 3 – 4) отличаются и по условиям заложения фундаментов, и по свойствам грунтов основания. Вероятность достижения предельного состояния по фактору относительной разности осадок ($\Delta S/L$), которая для данного вида зданий была принята 0,002, составляет $P_1 = 2 \times 10^{-4}$. Во-вторых, сравнивалась прочность кирпичной кладки со значением, полученным в результате расчета МКЭ, вероятность разрушения стены здания по условию исчерпания прочности кладки при сжатии составила $P_2 = 1,619 \times 10^{-2}$. Тогда обобщенный риск возникновения аварийной ситуации в здании по двум критериям составляет

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 1 - (1 - 0,0002)(1 - 0,01619) = 0,0164.$$

Данное значение намного превышает нормируемое: для критерия неравномерных осадок данного типа здания оно составляет 1×10^{-3} , а для стен – 5×10^{-5} , тогда обобщенный риск возникновения аварийной ситуации в здании по двум критериям составляет

$$P_n = 1 - (1 - P_{1n})(1 - P_{2n}) = 1 - (1 - 0,001)(1 - 0,00005) = 0,00105.$$

Поскольку не выполняется условие по обеспечению надежности для кирпичной стены, то необходимо выполнить усиление здания. Усиление было запроектировано посредством установки монолитного железобетонного пояса в уровне перекрытия 2-го этажа, устройства обойм простенков из металлических уголков и планок. Все эти мероприятия предваряли надстройку 3-го этажа библиотеки из легких бетонных блоков. Далее производился расчет уже 3-этажного здания (рис. 14), получены кривые распределения прочности усиленной кладки (рис. 15).

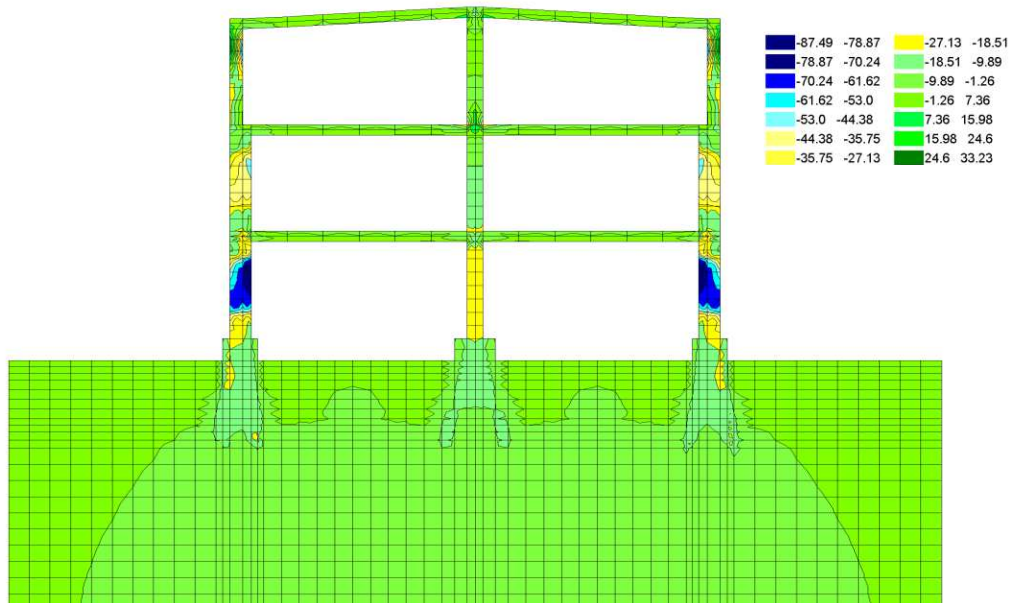


Рис. 14. Расчетная схема поперечника здания и уровень напряжений N_z (m/m^2) в элементах здания, усиленного монолитным поясом, обоями в простенках и с надстроенным третьим этажом

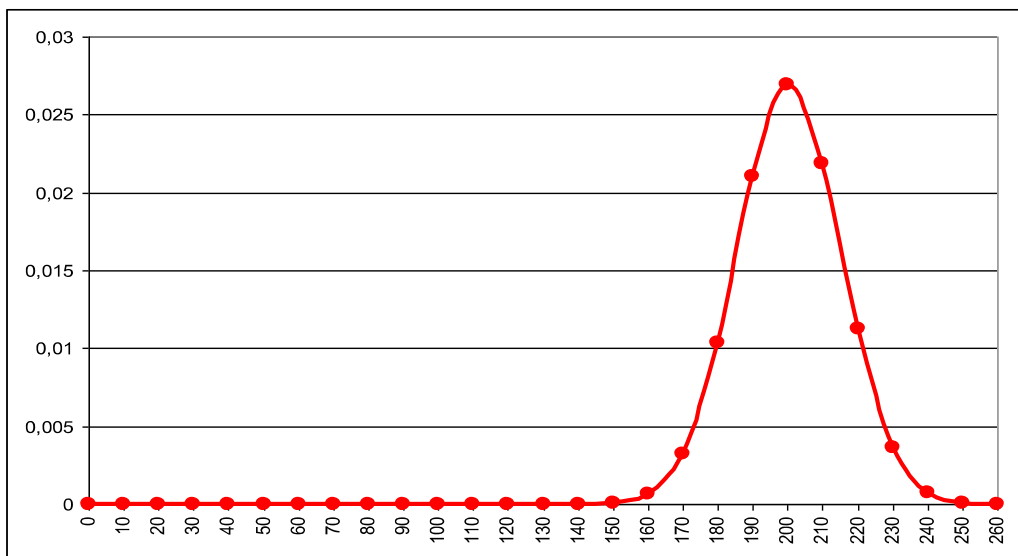


Рис. 15. Кривая функции плотности вероятности нормального распределения СВ прочности усиленной кирпичной кладки

После усиления вероятность неразрушения по критерию прочности кирпичной кладки равна 1×10^{-5} .

Таким образом, обобщенный риск достижения зданием предельного состояния после усиления составляет:

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 1 - (1 - 2 \cdot 10^{-4})(1 - 1 \cdot 10^{-5}) = 0,0002.$$

Т.е. обобщенное значение риска возникновения аварийной ситуации по двум критериям после усиления стены здания удовлетворяет значениям, регламентируемым нормативными документами.

Выводы:

1. Для вероятностных расчетов оснований реконструируемых зданий возможно использовать статистические данные СВ свойств грунтов и свойств строительных материалов зданий.

2. При определении уровня надежности одной из частей системы можно воспользоваться методом статистических испытаний Монте-Карло.

3. Зная нормативный уровень надежности для конструкций и сооружений, можно выбрать такое техническое решение усиления системы ОФС, которое бы обеспечивало этот уровень надежности.

Литература

1. Ермолаев, Н.Н. Надежность оснований сооружений / Н.Н. Ермолаев, В.В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.

2. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

3. Вайнберг, А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы: монография / А.И. Вайнберг. – Харьков, 2008. – 304 с.

4. Лычев, А.С. Надежность строительных конструкций: учебное пособие / А.С. Лычев. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 184 с.

5. Пичугин, С.Ф. Надежность строительных конструкций производственных зданий: монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава: ООО «Асми», 2009. – 452 с.

6. Райзер, В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В.Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.

7. Райзер, В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / В.Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.

8. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 256 с.

9. Улицкий, В.М. Оценка риска и обеспечение безопасности в строительстве / В.М. Улицкий, М.Б. Лисюк // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2002. – № 5.

10. Ho, K., Leroi, E., and Roberds, B. Quantitative risk assessment: application, myths and future direction / Proc. of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, 2000.

11. Hoej, N.P. Risk and Safety Considerations at Different Project Phases / Safety, risk, and reliability – trends in engineering. International Conference. Malta, 2001. – P. 1 – 8.

12. Sêco e Pinto, P. Some reflections about risk analysis of geotechnical structures: proc. of the 12th Danube-European Conference. Passau. 2002. – P. 41 – 46.

Надійшла до редакції 03.10.2013

© О.В. Кічасва