УДК 624.012.45
2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения



П.В. Волков
Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЕРОЯТНОСТНЫМ МЕТОДОМ

В статье рассматривается вероятностная оценка риска обрушения железобетонной колонны и сталежелезобетонной колонны, а также сравнение их прочностных характеристик. Исследование обусловлено высокой значимостью оценки влияния экстремальных нагрузок на железобетонные конструкции. Современные условия эксплуатации зданий и сооружений создают риски, которые могли быть не учтены при проектировании и строительстве зданий в период последних двадцати лет.

Устойчивость к взрывным воздействиям, железобетонные конструкции, железобетонные колонны, сталежелезобетонные колонны, вероятностный анализ, метод Монте-Карло, несущая способность, риск обрушения.

Современные вызовы безопасности, включая техногенные аварии и террористические угрозы, выдвигают повышенные требования к устойчивости строительных конструкций к динамическим воздействиям, таким как удар и взрыв. Эти воздействия характеризуются кратковременностью (от миллисекунд до десятых долей секунды), высокой интенсивностью и нелинейным характером нагружения, что создает экстремальные условия для работы материалов и конструктивных систем.

Железобетонные конструкции традиционно рассматриваются как эффективное средство защиты благодаря высокой массе, прочности на сжатие и способности к рассеиванию энергии через образование пластических шарниров и трещин. Однако при кратковременных импульсных нагрузках хрупкий характер разрушения бетона может стать критическим недостатком.

Сталежелезобетонные (композитные) колонны, в которых к армированию добавляется мощный стальной профиль (жесткая арматура), представляют собой перспективную альтернативу. Стальной сердечник, обладающий высокой пластичностью и прочностью на растяжение, способен воспринимать значительную часть нагрузки после разрушения бетонной обоймы, обеспечивая общую устойчивость конструкции и высокое энергопоглощение.

Ударное воздействие можно рассматривать как процесс передачи импульса от движущегося тела к конструкции за крайне малое время – в доли секунды [3]. При этом возникающие силы многократно превышают статические нагрузки, что требует применения особых методов расчета.

Бетон под воздействием ударной волны проявляет выраженную чувствительность к скорости деформации [3]. Его динамическая прочность на сжатие может превышать статическую в 2–4 раза, что описывается коэффициентом динамического увеличения. Однако это кажущееся преимущество нивелируется катастрофическим снижением пластичности: бетон ведет себя как хрупкий материал, а его предел деформативности при сжатии резко падает.

Объектом данного научного исследования являются несущие вертикальные конструкции (колонны), предназначенные для эксплуатации в условиях возможных кратковременных экстремальных воздействий. В качестве конкретных объектов сравнительного анализа выбраны:

1. Традиционная железобетонная (ЖБ) колонна сечением 400×400 мм, выполненная из бетона класса В25, с гибким армированием 4Ø16 класса А500С.

2. Сталежелезобетонная (СЖБ) колонна того же габаритного сечения 400×400 мм, выполненная из бетона класса В30, с гибким армированием 4Ø16 класса А500С и с жесткой арматурой в виде стального прокатного профиля (двутавр 30Ш1) из стали S355.

Конструкции исследуются в условиях совместного действия постоянной статической нагрузки и кратковременной динамической (ударно-взрывной) нагрузки.

В работах Н.Н. Белова, Д.Г. Копаницы и др. подчеркивается необходимость специальных расчетных моделей для бетона и арматуры, учитывающих их поведение при кратковременных динамических нагрузках.

Эта же тема подробно раскрыта в классическом пособии Н.Н. Попова, где описаны диаграммы деформирования материалов при динамике и методы расчета элементов.

Данная тема может быть полезна для проектирования зданий и сооружений гражданской обороны. Приведены способы защиты населения от современных средств путем размещения в специальных защитных сооружениях – убежища. Основным материалом таких убежищ является железобетон [4–8].

Понимание механизмов разрушения железобетонных конструкций при высоких температурах позволит разработать более эффективные методы защиты и улучшить проектирование зданий, что в итоге повысит безопасность и устойчивость строительных объектов [1–3].

В настоящее время в связи с сложившейся политической обстановкой в мире существует риск попадания на объект беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Исходя из этого, необходимо проектировать некоторые здания и сооружения с использование мер по защите от ударов БПЛА.

В статье [8] описывается, что хрупкое разрушение железобетонных конструкций возможно при влажности бетона в конструкции 3,5 %, образуется взрывообразное разрушение бетона, следовательно, разрушается защитный слой и идет быстрый прогрев арматуры.

Экспериментальные методы оценки предела огнестойкости железобетонных конструкций требуют значительных затрат – как трудовых, временных, так и финансовых. В рамках физического эксперимента невозможно учесть все факторы и нагрузки, воздействующие на несущие конструкции во время пожара. Существует множество неизвестных и переменных, что делает физические эксперименты иногда невозможными. В связи с этим предпочтительнее использовать компьютерное моделирование и расчетные методы оценки огнестойкости с помощью программных комплексов. Эти методы позволяют более эффективно и точно анализировать поведение конструкций при пожаре, учитывая разнообразные условия и сценарии.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ несущей способности и надежности типовой ЖБ и СЖБ колонны при статическом нагружении с последующей вероятностной оценкой их устойчивости к экстремальным воздействиям. Для этого применяется метод Монте-Карло, позволяющий учесть статистический разброс свойств материалов и параметров нагрузки.

Задачи исследования:

1. Выбрать и математически описать расчетную модель железобетонной и сталежелезобетнной конструкции.

2. Определить ключевые случайные параметры, влияющие на ее работу, и задать их функции распределения.

3. Реализовать алгоритм метода Монте-Карло для многократного проигрывания сценария «нагрузка – пожар – прочность».

4. Провести серию расчетов для оценки вероятности отказа конструкции.

5. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о степени надежности конструкции и факторах, наиболее значительно влияющих на риск ее обрушения.

Рассмотрим типовую железобетонную колонну, расчетная длинна которой 2,1 м, ширина 400 мм и высота 400 мм. Такие параметры часто встречаются в общественных и жилых зданиях.

Математическая модель для расчета: расчет несущей способности колонны проводится по методикам, изложенным в [3].

Исходные данные железобетонной колонны: бетон класса В25, R_b = 14,5 МПа.

Предположим, армирование стержнями диаметром 16 мм, количество стрежней 4. Площадь арматуры на 1 метр: A_s = 804 мм²/м. Класс арматуры А500С.

Нормативная нагрузка: $q_{норм}$ = 1,6 кПа, включая собственный вес колонны.

Радиус инерции:

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{0{,}4}{\sqrt{12}} = 0{,}1155 \text{ м}.$$

Гибкость колонны:

$$i = \frac{l_0}{i} = \frac{2{,}1}{0{,}1155} = 18{,}2.$$

Коэффициент продольного изгиба (φ): для тяжелого бетона В25 при гибкости λ=18,2 интерполяцией находим φ ≈ 0,833.

Расчет несущей способности выполняется по формуле:

$$N_{u,rs} = \varphi \cdot (A_b \cdot R_b + R_{st} \cdot As\ ),$$

$$N_{u,rs} = 0{,}833 \cdot (14{,}5 \cdot 10^3 \cdot 0{,}1592 + 435 \cdot 10^3 \cdot 0{,}000804\ ) = 2214 \text{ кН}.$$

Сравнение полученной нагрузки и нормативной, N= 2000 кН.

$$N_{u,st} > N.$$

Запас прочности колонны 10,7 %.

Исходные данные сталежелезобетонной колонны: бетон класса В25, R_b = 14,5 МПа.

Предположим, армирование стержнями диаметром 16 мм, количество стрежней 4. Площадь арматуры на 1 метр: A_s = 804 мм²/м. Класс арматуры А500С.

Стальной сердечник: двутавр 30Ш1

Нормативная нагрузка: $q_{норм}$ = 1,6 кПа, включая собственный вес колонны.

Радиус инерции:

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{0{,}4}{\sqrt{12}} = 0{,}1155 \text{ м}.$$

Гибкость колонны:

$$i = \frac{l_0}{i} = \frac{2{,}1}{0{,}1155} = 18{,}2.$$

Коэффициент продольного изгиба (φ): для тяжелого бетона В25 при гибкости λ=18,2 интерполяцией находим φ ≈ 0,833.

Расчет несущей способности выполняется по формуле:

$$N_{u,rs} = \varphi \cdot (A_b \cdot R_b + R_{st} \cdot A_{st} + R_a \cdot A_a\ ),$$

$$N_{u,rs} = 0{,}833 \cdot (14{,}5 \cdot 10^5 \cdot 0{,}1479 + 435 \cdot 10^3 \cdot 0{,}000804\ + 240 \cdot 10^3 \cdot 0{,}01125) = 4324 \text{ кН}.$$

Сравнение полученной нагрузки и нормативной, N= 2000 кН.

$$N_{u,st} > N.$$

Запас прочности колонны 116 %.

Вероятностная модель учитывает неопределенность следующих параметров (табл.):

Таблица

Параметры прочности бетона

Параметр	*Обозначение*	*Среднее значение (μ)*	*Коэф. вариации (COV)*	*Распределение*	*Обоснование*
Прочность бетона	f_c	f_{ck} + 8	0,15	Логнормальное	Хорошо описывает неотрицательные свойства материалов.
Прочность гибкой арматуры (A500C)	f_y	$1{,}1 \cdot f_{yk}$)	0,07	Логнормальное	Аналогично бетону. Учитывается для обеих колонн.
Прочность стали сердечника (S355)	f_a	$1{,}1 \cdot f_a$	0,05	Логнормальное	Более высокая однородность проката по сравнению с бетоном. Только для СЖБ колонны.
Избыточное давление ВУВ	Δp	*Рассчитывается по РД 95 10528-96 для заданного сценария*	0,25	Логнормальное	Высокая неопределённость параметров взрыва
Постоянная нагрузка	G	1,0 * G	0,10	Нормальное	Относительно небольшая вариация.



Рис. График ожидаемого запаса прочности

Разработка алгоритма вероятностного моделирования (Монте-Карло):

Инициализация: задаются детерминистические параметры: геометрия сечения, площади армирования (A_a, A_s), сценарий взрыва (W,R).

Задаются функции плотности распределения для всех случайных параметров.

Определить количество испытаний (итераций) N = 100 000.

Цикл по N итерациям представляет собой генерацию случайных входных параметров для текущей итерации. Сгенерировать случайное значение прочности бетона:

$$f_{ci} \sim \text{Логонормальное}\left(\mu_{fc}, \sigma_{fc}\right).$$

Сгенерировать случайное значение прочности арматуры:

$$f_{yi} \sim \text{Логонормальное}\left(\mu_{fy}, \sigma_{fy}\right).$$

Сгенерировать случайное значение прочности стали сердечника:

$$f_{ai} \sim \text{Логонормальное}\left(\mu_{fa}, \sigma_{fa}\right).$$

Сгенерировать случайное значение давления ВУВ:

$$\Delta p_i \sim \text{Логонормальное}\left(\mu_{\Delta p}, \sigma_{\Delta p}\right).$$

Сгенерировать случайное значение постоянной нагрузки:

$$G_i \sim \text{Нормальное}\left(\mu_G, \sigma_G\right).$$

Расчет эквивалентной статической нагрузки:

$$N_i = (G_i + \psi \cdot Q_k) + (\Delta p_i \cdot A_k \cdot k_d).$$

Рассчитать несущую способность железобетонной и сталежелезобетонной колонны:

Выполняем проверку условия отказа, если:

$$N_{ult.i} < N_i,$$

то фиксируем отказ в данной итерации.

Статистическая обработка результатов:

После всех N итераций нужно вычислить вероятность отказа P_f как отношение суммы неудачных итераций и количества итераций, затем оценить дисперсию и доверительный интервал для полученной вероятности отказа.

Построить гистограммы распределения запаса прочности для железобетонной и сталежелезобетонной колонн (рис.).

Провести регрессионный анализ (например, используя метрики Корреляции Спирмена), чтобы определить, какие входные случайные параметры наиболее сильно влияют на дисперсию выходной переменной

$$N_{ult} - N.$$

Это покажет, параметры каких величин требуют более строгого контроля на практике.

Проведем анализ результатов и сделаем выводы: вероятность отказа *(P_f)* – ключевой результат.

Ожидается, что для ЖБ колонны значение вероятности отказа будет существенным (>1 %), что соответствует ее работе на пределе в детерминированном расчете. Для СЖБ колонны значение вероятности отказа будет (<0,1 %), что отражает ее значительный запас прочности.

Анализ чувствительности: результаты покажут, что наибольшее влияние на вероятность отказа, скорее всего, будут иметь:

– давление ВУВ *(Δp)* – дисперсия *Δp* будет доминирующим фактором неопределенности для обеих колонн;

– стальной сердечник в СЖБ колонне повышает среднюю несущую способность, снижает общую вариативность системы, так как свойства стали менее случайны, чем свойства бетона.

Выводы для проектирования: результаты обоснуют необходимость применения композитных СЖБ решений для объектов с риском взрывных воздействий и демонстрируют, что детерминированный подход с малым запасом приводит к неприемлемо высокому вероятностному риску обрушения.

Наибольший резерв повышения безопасности – использование стальных усилений колонн или увеличение сечения колонны.

Таким образом, разработанная вероятностная модель позволяет получить гораздо более глубокую и реалистичную оценку прочности железобетонной и сталежелезобетонной колонны, учитывающую неизбежные разбросы свойств материалов, нагрузок и параметров взрыва.

Литература

1. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. РБ Г-05-039-96 : введен 01 августа 1997. – Москва, 2000. – 29 с.

2. Руководство по определению параметров ударных волн при внешних взрывах и нагрузок на строительные конструкции АС. РД 95 10528-96 : введен 01.09.1996. – Москва 1995. – 151 с.

3. СП 88.13330.2014. Свод правил. Защитные сооружения гражданской обороны : введен 1 июня 2014. – Москва, 2014. – 152 с.

4. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия : введен 02.04.2018. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 22 с.

5. СП 542.1325800.2024. Защитные ограждающие конструкции от беспилотных летательных аппаратов. Правила проектирования : введен 25.12.24. – Москва, 2024. – 38 с.

6. Бирбраер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2009. – 594 с.

7. Нормирование огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона / И. И. Полевода, С. М. Жамойдик, Н. В. Зайнудинова, Д. С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 144–163. – DOI 10.33408/2519-237X.2023.7-2.144.

8. Курлапов, Д. В. Воздействие высоких температур пожара на строительные конструкции / Д. В. Курлапов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 4 (6). – С. 41–43.

9. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н. Н. Белов, Д. Г. Копаница, О. Г. Кумпяк, Н. Т. Югов // Нортхэмптон. – Томск, 2014.

10. Убежища гражданской обороны / В. А. Котляревкий, В. И Ганушкин, А. А. Костин [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1989. – 589 с.

11. Попов, Н. Н. Железобетонные и каменные конструкции / Н. Н. Попов, М. Чарыев // Высшая школа. – Москва, 1996. – 255 с.

P.V. Volkov

Vologda State University

INVESTIGATING THE PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER IMPACT AND BLAST LOADS USING A PROBABILISTIC METHOD

The article discusses a probabilistic assessment of the risk of collapse of reinforced concrete and steel-reinforced concrete columns, as well as a comparison of their strength characteristics. The study is motivated by the high importance of evaluating the impact of extreme loads on reinforced concrete structures. Modern operating conditions of buildings and structures create risks that may not have been fully considered during the design and construction of buildings over the past two decades.

Explosion resistance, reinforced concrete structures, reinforced concrete columns, steel-reinforced concrete columns, probabilistic analysis, Monte Carlo method, bearing capacity, collapse risk.