

УДК 624.042: 624.046

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92818>

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ В СЛУЧАЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ**

Канд. техн. наук А. Н. Шаповалов, асп. В. В. Руденко

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ У ВИПАДКУ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ**

Канд. техн. наук А. М. Шаповалов, асп. В. В. Руденко

**THE THEORETICAL BACKGROUND OF RELIABILITY OF MULTISTORIED REINFORCED-CONCRETE SKELETON-TYPE BUILDINGS IN CASE OF PROGRESSIVE COLLAPSE**

Phd., tehn. A. N. Shapovalov, sciences, pg. V. V. Rudenko

*В статье приводится детальный анализ определения одного из вариантов параметров надежности в системе железобетонного каркаса здания на примере двенадцатиэтажного безригельного каркаса. Рассмотрена методика определения вероятности безотказной работы каркаса в случае прогрессирующего обрушения с учетом повышения процента армирования колонн и повышения класса бетона. Установлено, что повышение класса бетона оказывается более благоприятным условием для обеспечения стабилизации разрушения по сравнению с повышением процента армирования колонн.*

**Ключевые слова:** надежность, прогрессирующее обрушение, показатель вероятности безотказной работы, железобетонный каркас, модели несущих элементов.

У статті подано детальний аналіз визначення одного з варіантів параметрів надійності в системі залізобетонного каркаса будівлі на прикладі дванадцятиповерхового безригельного каркаса. Розглянуто методику виявлення ймовірності безвідмовної роботи каркаса у випадку прогресуючого обвалення з урахуванням підвищення відсотка армування колон та підвищення класу бетону. Встановлено, що підвищення класу бетону виявляється найбільш сприятливою умовою для забезпечення стабілізації руйнування порівняно з підвищенням відсотка армування колон.

**Ключові слова:** надійність, прогресуюче обвалення, показник ймовірності безвідмовної роботи, залізобетонний каркас, моделі несучих елементів.

*This article presents the detailed analysis of determination of one of the variants of reliability parameters as for the system of reinforced concrete building frame by the example of twelve-storied jointless frame without girders and joints. Building plan dimension is 24x24 m, reinforced concrete column grid is 6x6 m, columns section is 400x400 mm, story height is 3 m and monolithic slab thickness is 200 mm. The article presents the method of determination of reliability index of frame in case of progressive collapse taking into account increase of columns reinforcement ratio and concrete grade. Block modeling system consisting of three blocks of elements (columns, floors and joints) was assigned during assessment of chosen model.*

*SCAD office software was used for determination of number of collapsed element at every block under condition of removal of one column on ground floor. Reliability theory was employed for determination of reliability index of building frame under condition of changing the columns reinforcement of the first four floors from 1.25% to 5%. The calculated reliability index was 0.953. Similar assessments were performed for a given model under condition of replacement of C20/25 concrete grade with C40/50 at an interval of one step. In this case the calculated reliability index was 0.986.*

*It was determined that the higher concrete grade is more preferable for collapse stabilizing in compare with increase of columns reinforcement ratio.*

**Keywords:** reliability, progressive collapse, reliability index, reinforced concrete skeleton frame, load-bearing elements models.

**Введение.** В настоящее время в проектной и строительной практике в соответствии с нормативными требованиями [1, 2] все чаще и чаще рассматриваются вопросы обеспечения надежности и безопасности эксплуатации объектов архитектуры, особенно в случае их повышенной ответственности и социальной значимости. Немаловажным вопросом в этом случае является также расчет объекта на прогрессирующее обрушение.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросам расчета многоэтажных железобетонных зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение на

сегодняшний день посвящено ряд работ отечественных и зарубежных ученых и исследователей [3, 4, 5]. В этих статьях акцентируется внимание на алгоритм расчета каркасных зданий в случае прогрессирующего обрушения, особое внимание уделяется методике снижения последствий этого процесса, но недостаточно данных о теоретических основах обеспечения надежности многоэтажных железобетонных каркасных зданий в случае прогрессирующего обрушения.

**Определение цели и задачи исследования.** Целью предложенного

исследования является анализ одной из существующих методик по уменьшению влияния процесса прогрессирующего обрушения на сохранность всего комплекса здания или сооружения [6, 7, 8]. В этом случае определяющими факторами могут служить как конструктивные решения железобетонного каркаса здания, так и процент армирования сечений основных несущих элементов, класс бетона, узловые сопряжения, прочность и жесткость перекрытий, устройство ауригерных этажей и целый ряд дополнительных факторов.

Среди этой группы защитных мероприятий можно выделить такую часть, которая может существенным образом повлиять на надежность и безопасность здания в целом в случае предотвращения или уменьшения влияния процесса прогрессирующего обрушения. К этой части можно отнести усиленное армирование несущих элементов, в частности колонн, и величину класса бетона всего каркаса здания.

**Основная часть исследований.** Так как произвольное здание или сооружение можно рассматривать как многокомпонентную систему, в состав которой включаются элементы с

определенной степенью надежности, то можно использовать различные подходы в моделировании каркаса здания в целом, пользуясь существующей теорией надежности о взаимосвязи отдельных элементов. Наиболее распространены три основные модели соединения блоков-элементов: последовательное, параллельное и смешанное (комбинированное). Каждый из этих способов соединения элементов имеет свои достоинства и недостатки. Вероятность безотказной работы общей системы  $P_s(t)$  при различных моделях в значительной мере зависит от количества элементов  $n$  и функций надежности каждого из этих элементов  $P_i(t)$ .

На рис.1 приведена зависимость безотказной работы системы  $P_s(t)$  на заданном промежутке времени  $t$  при различных моделях соединения  $n$  элементов общей системы [6]. Каждый элемент в свою очередь имеет показатель безотказности  $P_i(t)$ . Как видно из графиков, при последовательном соединении показатель безопасности уменьшается с увеличением количества элементов  $n$ , в то же время при параллельном соединении увеличение количества элементов системы приводит к увеличению показателя безотказной работы  $P_s(t)$ .

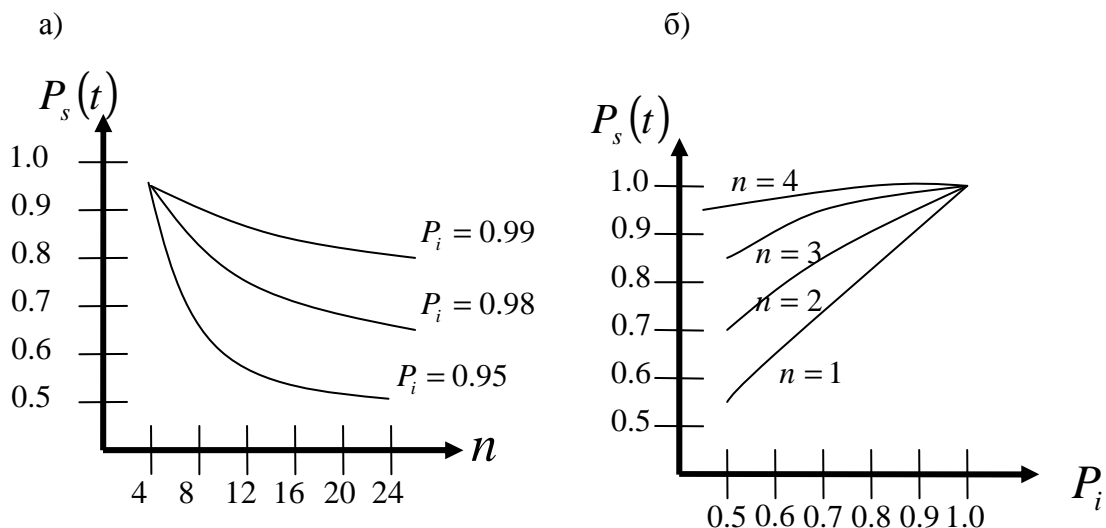


Рис. 1. Вероятность безотказной работы  $P_s(t)$  в случае:  
а – последовательного соединения элементов; б – параллельного соединения элементов

Рассматривая многокомпонентную систему многоэтажного каркасного здания, где в процессе прогрессирующего обрушения могут выходить из строя отдельные группы элементов, предлагается учитывать в расчете надежности здания параллельную систему соединения отдельных групп элементов здания. На рис. 2 приведена условная модель двенадцатиэтажного каркасного

железобетонного здания, в котором рассмотрена в качестве первого элемента – блок колонн, второго элемента – блок перекрытий, третьего элемента – блок узловых сопряжений. Для каждого из этих блоков определялась вероятность безотказной работы  $P_i(t)$ , а затем безотказность работы всей системы  $P_s(t)$  в зависимости от повышения процента армирования колонн и класса бетона.



Рис. 2. Модель соединения группы основных несущих элементов многоэтажного каркасного здания ( $n=3$ )

Параметры надежности каждого блока определялись на основании численных методов с применением вычислительного программного комплекса «SCAD office», версия 21.1. Для обеспечения жесткости каркаса были рассмотрены два вида диафрагм жесткости: замкнутого прямоугольного блока и в виде крестообразной формы, при этом в качестве переменного параметра рассматривался процент армирования колонн от 1,25 до 5 %, а в качестве разрушенного элемента рассматривалась предпоследняя колонна крайнего ряда К-20 (рис. 3) на первом этаже.

Параметры расчетной модели принимались как наиболее распространенные в практике строительства: размеры здания в плане 24x24 м, сетка колонн 6x6 м,

количество этажей 12, высота этажа – 3 м, сечение колонн 400x400 мм, толщина железобетонной плиты перекрытия 200 мм, переменная нагрузка на перекрытие 4 кН/м<sup>2</sup>. Конструктивная схема модели: монолитный безригельный каркас с жестким сопряжением колонн и плит перекрытий. При использовании вычислительного комплекса «SCAD office» подключался специальный блок «ПО» (прогрессирующее обрушение), на основании которого определялось количество вышедших из строя колонн, количество участков разрушенных перекрытий и ослабленных узлов сопряжений колонн с перекрытиями. Чтобы сократить количество внешних силовых факторов на развитие процесса прогрессирующего обрушения, в расчете

учитывалось влияние только вертикальной нагрузки, равномерно распределенной по

всей поверхности перекрытий на всех этажах.

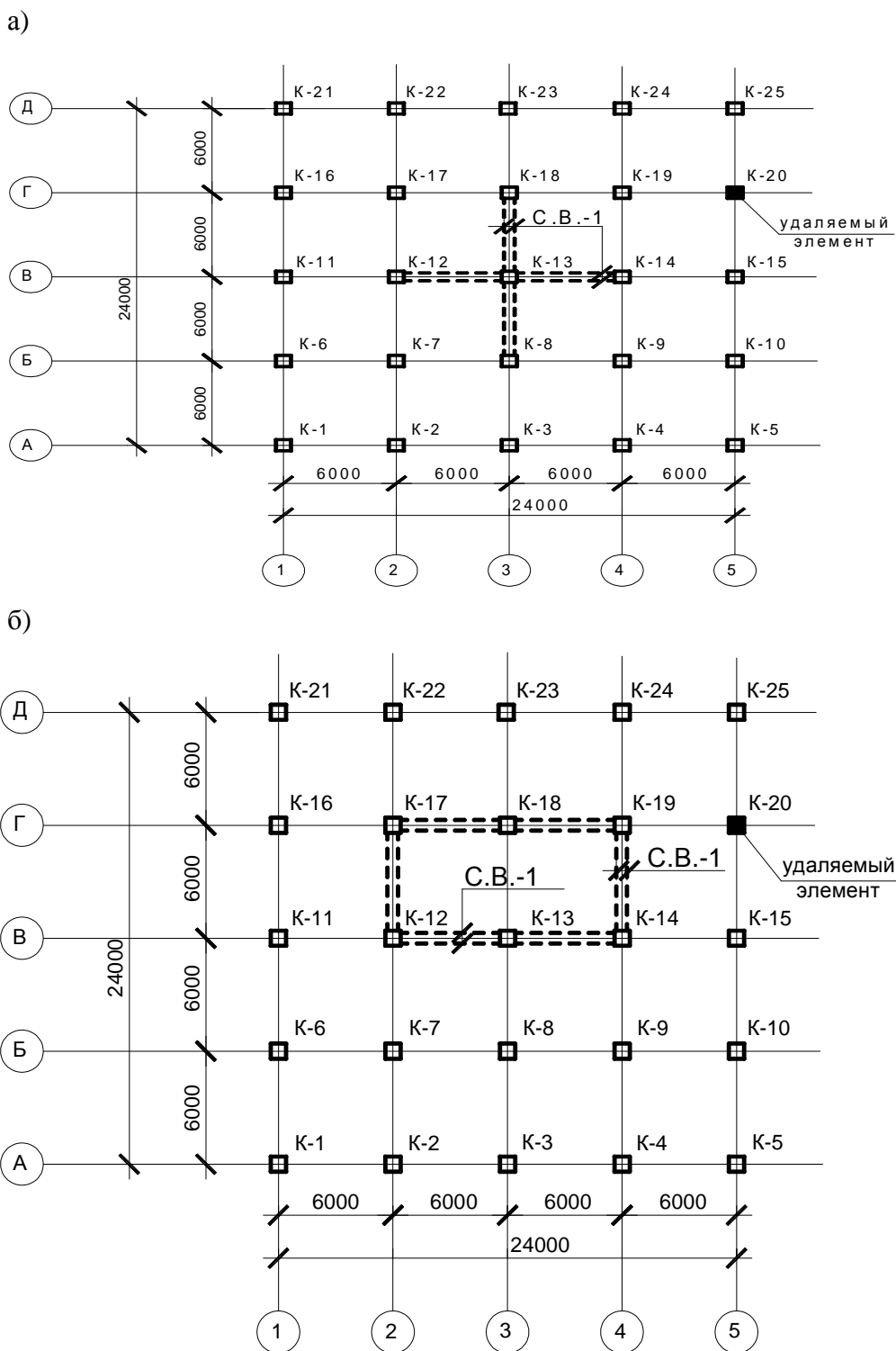


Рис. 3. План двенадцатиэтажного безригельного каркасного здания с нумерацией колонн:  
 а – замкнутое расположение диафрагм жесткости; б – крестообразное расположение диафрагм жесткости

В результате произведенных вычислений с учетом выхода из строя одной колонны крайнего ряда первого этажа были получены значения разрушенных несущих элементов здания (колонн, участков перекрытий, стыков) в зависимости от заданных процентов армирования всех колонн первого, второго, третьего и четвертого этажей. Колонны выше расположенных этажей армировались на основании исходного статического расчета и конструктивных требований, то

есть для колонн сечением 400x400 мм принималось армирование 8Ø16 А400С с площадью 16,08 см<sup>2</sup> и процентом армирования 1,05 %. Усиление армирования для этой группы колонн не предусматривалось с той целью, чтобы проанализировать влияние нарастающего процента армирования в колоннах первых четырех этажей на количество разрушенных элементов по всему объему здания. Полученные значения разрушенных элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние процента армирования колонн первых 4 этажей на количество разрушенных элементов всего здания при выходе из строя одной колонны первого этажа

Общее количество несущих элементов	Разрушенные элементы при процентах армирования колонн 1 – 4 этажей				
	1,25	2	3	3,8	5,03
Колонны, 300 шт.	48/36	40/30	32/18	15/7	10/3
Перекрытия, 6912 участков	2004/1382	1550/1175	1382/1071	1175/968	899/762
Стыки, 300 шт.	40/30	27/18	19/12	13/6	9/3

**Примечание.** В числителе указано количество разрушенных элементов при крестообразной диафрагме жесткости внутри здания, в знаменателе разрушенные элементы при замкнутой прямоугольной диафрагме жесткости.

Данные табл. 1 могут быть использованы как статистический материал при оценке теоретической надежности рассматриваемой модели, состоящей из n=3 блоков – элементов при возникновении процесса прогрессирующего обрушения.

Вероятность безотказной работы заданной модели – системы, которая состоит из n элементов, соединенных параллельно [6, 7, 8] может быть определена по формуле:

$$P_s(t) \approx r[P_i(t)_{\max}] + (1-r) \left[ 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P_i(t)\} \right] \quad (1)$$

где  $r$  – обобщенный коэффициент корреляции, который может быть определен по формуле:

$$r = r_m \left\{ 2 - \left[ r_m + \frac{(1-r_m)(3-\lg n)}{1-0.1r_m^2(3-\lg n)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

тогда средний коэффициент корреляции:

$$r_m = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{ij} r_{ij}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество элементов в системе модели;

$r_{ij}$  – коэффициент корреляции по отдельным блокам – элементам [8, 9].

На основі проведених вичислень визначалось кількість зруйнованих колонн по всіх етажах вибраної моделі в залежності від типу діафрагм жорсткості і процента армування колонн в межах перших чотирьох етажів. Було отримано статистичний матеріал, наведений в табл. 1, для можливості визначення необхідних параметрів теорії надійності, зокрема математичне очікування, дисперсія, середнє квадратичне відхилення, статистичні початковий і кореляційний моменти, а також узагальнений коефіцієнт кореляції і параметр надійності  $P_s(t)$  [10,11].

Кінцева мета такого розрахунку зводилась до визначення параметра надійності і припинення процесу прогресуючого обвалення будівлі, іншими словами, до стабілізації руйнування несучих елементів.

Показники надійності по елементах склали при  $\mu = 1,25\%$ :

- для блоку колонн

$$P_1(t) = 1 - \frac{48 + 36}{2 \cdot 300} = 0,86;$$

- для блоку перекриттів

$$P_2(t) = 1 - \frac{2004 + 1382}{2 \cdot 6912} = 0,755;$$

- для блоку стыков

$$P_3(t) = 1 - \frac{40 + 30}{2 \cdot 300} = 0,883.$$

$$\prod_{i=1}^3 = (1 - 0,86)(1 - 0,755)(1 - 0,883) = 0,00401.$$

Несмещенные дисперсии для колонн:

$$\tilde{D}_n = \frac{211,98 \cdot 10}{10 - 1} = 235,5,$$

$$\tilde{D}_\mu = \frac{1,74 \cdot 10}{10 - 1} = 1,93.$$

Коефіцієнт кореляції для колонн:

$$r_{\mu n} = \frac{\tilde{k}_{\mu n}}{\tilde{\sigma}_\mu \cdot \tilde{\sigma}_n} = \frac{19,999}{15,34 \cdot 1,382} = 0,943.$$

Несмещенные дисперсии для перекрытий:  $\tilde{D}_n = 13,09 \cdot 10^4$ ,  $\tilde{D}_\mu = 1,91$ .

Коефіцієнт кореляції для перекрытий:  $r_{\mu n} = 0,797$ .

Несмещенные дисперсии для стыков:

$$\tilde{D}_n = 135,57. \quad \tilde{D}_\mu = 1,91.$$

Коефіцієнт кореляції для стыков:

$$r_{\mu n} = 0,813.$$

Средняя величина коэффициента корреляции для всего здания равна:

$$r_m = \frac{2}{3(3-1)} \cdot (0,943 + 0,797 + 0,813) = 0,851.$$

Узагальнений коефіцієнт кореляції визначено за формулою (2):

$$r = 0,851 \left\{ 2 - \left[ 0,851 + \frac{(1 - 0,851) \cdot (3 - \lg 3)}{1 - 0,1 \cdot 0,851^2 (3 - \lg 3)^2} \right] \right\} = 0,387.$$

Показатель надійності і стабільності руйнування при зміні процента армування колонн від 1,25% до 5%

$$P_s(t) = 0,387 \cdot 0,885 + (1 - 0,387)[1 - 0,00401] = 0,953.$$

Аналогічні розрахунки були зроблені для розглянутої моделі будівлі при початковому проценті армування колонн з першого по

четвертый этажи, т. е. 1,25 %, но с изменением класса бетона, обеспечивающим уменьшение количества разрушенных элементов здания при повышении класса бетона. В табл. 2 приведены результаты расчета вышеприведенной модели с указанием

количества разрушенных элементов по трем блокам (колонны, перекрытия, стыки) с изменением класса бетона от С20/25 до С40/50. В качестве аварийного (вышедшего из строя) несущего элемента рассматривалась колонна К-20 (рис. 3).

Таблица 2

Влияние класса бетона на количество разрушенных элементов всего здания при выходе из строя одной колонны первого этажа

Общее количество несущих элементов	Разрушенные элементы при классах бетона колонн 1-4 этажей				
	С20/25	С25/30	С32/40	С35/45	С40/50
Колонны, 300 шт.	48/36	44/32	41/30	39/30	37/27
Перекрытия, 6912 участков	2004/1382	1880/1160	1675/924	1508/836	1452/760
Стыки, 300 шт.	40/30	32/24	26/18	18/12	14/8

**Примечание.** В числителе указано количество разрушенных элементов при крестообразной диафрагме жесткости внутри здания, в знаменателе – разрушенные элементы при замкнутой прямоугольной диафрагме жесткости.

Коэффициенты корреляции при изменении классов бетона равны: для колонн  $r_{cn} = 0.4974$ , для перекрытий  $r_{c,пер} = 0.531$ , для стыков  $r_{c,c} = 0.905$ ; средний коэффициент корреляции  $r_m = 0.644$ , обобщенный коэффициент корреляции  $r = 0.087$ .

Показатели надежности по блокам-элементам:  $P_1(t) = 0.86$ ;  $P_2(t) = 0.755$ ;  $P_3(t) = 0.883$ .

$$\prod_{i=1}^3 = (1 - 0.86)(1 - 0.755)(1 - 0.883) = 0.00401.$$

Показатель надежности и стабилизации разрушения при изменении класса бетона от С20/25 до С40/50 равен:

$$P_s(t) = 0.087 \cdot 0.883 + (1 - 0.087)(1 - 0.00401) = 0.986.$$

Таким образом, можно отметить, что повышение класса бетона оказывается более благоприятным условием для обеспечения стабилизации разрушения по сравнению с повышением процента армирования колонн.

Если же рассматривать предельный процент армирования по колоннам первых четырех этажей и определять показатели надежности  $P_i(t)$  для колонн, перекрытий и

стыков, то величина  $P_s(t)$  существенно повышается и достигает значения 0,995. Однако предельный процент армирования существенно увеличивает расход арматуры по всему зданию и экономически будет неоправдан.

Поэтому целесообразно идти таким путем при проектировании зданий с учетом возникновения прогрессирующего обрушения, чтобы приближаться к



оптимальному проценту армирования колонн (2,5-3,0 %) и одновременно повышать класс бетона колонн до уровня С32/40. Такой же класс бетона можно принимать и для перекрытий. Стыки при этом могут усиливаться за счет установки дополнительной поперечной арматуры. Для каждого случая принятия процента армирования и класса бетона выполняется отдельный расчет.

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Среди существующих в настоящий период мероприятий по предотвращению последствий от прогрессирующего обрушения можно использовать наряду с отдельными мероприятиями конструктивного характера также повышение процента армирования несущих элементов и повышение класса бетона.

Расчет надежности здания с учетом стабилизации процесса разрушения можно выполнять на модели компоновки блоков отдельных несущих элементов с параллельным их соединением. Таких элементов может быть три, четыре, пять и более. Увеличение данных элементов с

определением уровня надежности каждого из них может повышать точность оценки надежности всего здания.

Выполненные теоретические расчеты с трехблочной системой элементов (колонны, перекрытия, стыки) на примере безригельного двенадцатиэтажного монолитного железобетонного каркаса показали, что более эффективным решением при стабилизации процесса разрушения является увеличение класса бетона  $R_s(t)=0,986$ , увеличение же процента армирования дает показатель надежности  $R_s(t)= 0,953$ .

Наиболее рациональным подходом в решении вопроса о надежности здания при возникновении прогрессирующего обрушения следует считать параллельное увеличение процента армирования несущих элементов и увеличение класса бетона.

В каждом конкретном случае необходимо выполнять специальные расчеты, чтобы набрать достаточный статистический материал и обеспечить выполнение требований нормативных документов по надежности и безопасности эксплуатации проектируемых объектов.

### *Список использованных источников*

1. Гордеев, В. ДБН В.1.2-14:2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] / В. Гордеев, М. Микитаренко, А. В. Перельмутер, В. Шимановський, О. Шимановський. – К., Мінрегіонбуд, 2009. – 48 с.
2. Бамбура, А. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст] / А. Бамбура, А. Барашиков, О. Давиденко, О. Голишев та ін. – К., Мінрегіонбуд, 2011. – 70 с.
3. Алмазов, В. О. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению [Текст] / В. О. Алмазов, А. И. Плотников, Б. С. Расторгуев // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ, 2011. – № 2. – С. 15-20.
4. Люблинский, В. А. Безопасность несущих систем зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов [Текст] / В. А. Люблинский, А. Г. Тамразян // Бетон и железобетон взгляд в будущее: 3-я Всероссийская (2-я Международная) конференция по бетону и железобетону 12-16 мая 2014 г. Т.1. – С. 90-99.
5. Wassim Ghannoum, M. Dynamic Collapse Analysis of a Concrete Frame Sustaining Column Axial Failures. Wassim Ghannoum M. and Moehle Jack P. // ACI Structural journal, technical paper, title no.109-S35 / May-June 2012. p. 403-412.

6. Барашиков, А. Я. Надійність будівель і споруд [Текст] / А.Я. Барашиков, М.Д. Сирота. – Інститут системних досліджень освіти. – К., 1993. – 202 с.
7. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
8. Кудзис, А. П. Оценка надежности железобетонных конструкций [Текст] / А.П. Кудзис. – Вильнюс: Мокслас, 1985. – 156 с.
9. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. – М.: ЮРАЙТ, 2012. – 479 с.
10. Самойленко, Н. И. Теория вероятностей [Текст]: учеб. для вузов / Н. И. Самойленко, А. И. Кузнецов, А. Б. Костенко. – Харьков: Изд-во «ХГМТ», 2009. – 199 с.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1973. – 365 с.

---

Шаповалов Олександр Микитович, канд. техн. наук доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.: 0663821598. E-mail: ashapovnik@gmail.com.

Руденко Вікторія Володимирівна, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.: 099-704-97-23. E-mail: rudikv@ukr.net.

Shapovalov Alexander, associate Professor, PhD Department of building structures

Beketov KharkivNationalUniversity of Municipal Economy. Tel.: 0663821598. E-mail: ashapovnik@gmail.com.

Viktorija Rudenko, postgraduate student Department of building structures Beketov KharkivNationalUniversity of Municipal Economy. Tel.: 099-704-97-23. E-mail: rudikv@ukr.net.

Стаття прийнята 24.11.2016 р.