

УДК 624.044:004.94

Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем

Наталья Витальевна КЛЮЕВА, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, e-mail: klynavit@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Павел Анатолиевич КОРЕНЬКОВ, ассистент, e-mail: kpa_gbk@mail.ru

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Академия строительства и архитектуры, Республика Крым, 295001 Симферополь, ул. Павленко, 3

Аннотация. Показана необходимость разработки расчетного обоснования параметров живучести конструктивных систем и методики их экспериментальной проверки применительно к рамно-стержневым железобетонным каркасам многоэтажных зданий. Предложены алгоритм расчета и физическая модель конструкции железобетонной рамы для моделирования живучести нелинейно деформируемых железобетонных каркасов многоэтажных зданий. Используемые многоуровневые расчетные схемы позволяют проводить критериальную оценку прочности железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям и установить сечения элементов, в которых достигаются предельные состояния. Разработана методика экспериментального определения параметра живучести и коэффициента динамических догрузений для опытной конструкции рамы при ее структурной перестройке, вызванной внезапным выключением одного из вертикальных несущих элементов. Эта методика может быть использована при разработке рекомендаций по защите зданий и сооружений от прогрессирующих разрушений для определения и нормирования параметров их живучести.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, живучесть, железобетонные конструкции, запроектные воздействия, многоэтажные рамные конструкции.

METHOD OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF SURVIVABILITY OF REINFORCED CONCRETE FRAME-ROD STRUCTURAL SYSTEMS

Natalia V. KLYUYEVA, e-mail: klynavit@yandex.ru

Southwest State University, ul. 50 let Oktyabrya, 94, Kursk 305040, Russian Federation

Pavel A. KOREN'KOV, e-mail: kpa_gbk@mail.ru

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Academy of Construction and Architecture, ul. Pavlenko, 3, Simferopol 295001, Republic of Crimea, Russian Federation

Abstract. The necessity of developing the computational substantiation of survivability parameters of structural systems and methods for their experimental verification with reference to frame-rod reinforced concrete frames of multistory buildings is shown. An algorithm of calculation and a physical model of a design of reinforced concrete frame for simulation of the survivability of non-linear deformed reinforced concrete frames of multistory buildings are proposed. The use of multilevel design schemes makes it possible to conduct the criterial assessment of the strength of reinforced concrete elements along normal and inclined sections and determine the sections of elements in which the limit state is reached. The authors have developed a technique for experimental determination of a structural survivability parameter and the coefficient of additional dynamic stresses for a experimental frame design at its structural rearrangement caused by the sudden failure of one of the vertical bearing elements. This technique can be used to develop recommendations on the protection of buildings and structures against the progressive ruptures for determination and regulation of parameters of their survivability.

Key words: progressive collapse, survivability, reinforced concrete structures, beyond design impacts, multi-storey frame structures.

В последние годы в России и за рубежом все больше внимания уделяется исследованиям, связанным с созданием нового направления конструктивной безопасности — живучести сооружений [1–7]. Однако все эти ис-

следования носят пока постановочный и фрагментарный характер. Экспериментальные обоснования теоретических положений в них практически отсутствуют. В этой связи разработка расчетного обоснования параметров жи-

вучести конструктивных систем и методики их экспериментальной проверки применительно к рамно-стержневым железобетонным каркасам многоэтажных зданий представляет теоретический и практический интерес.

Под живучестью здесь, как и в работах [8, 9], будем понимать способность конструктивной системы распределять нагрузку между остальными элементами в случае повреждения или ослабления одного из элементов (коррозия, внезапное выключение лишних элементов статически неопределимых систем).

Алгоритм расчета. Рассмотрим решение задачи применительно к конструктивной системе каркаса железобетонного монолитного многоэтажного здания, расчетные схемы которого приведены на рис. 1. В качестве проектной нагрузки служит распределенная поэтажная нагрузка на ригели. Запроектное воздействие принято в виде внезапного выключения из работы одного из вертикальных элементов — крайней колонны первого этажа.

Алгоритм расчета данного каркаса с использованием квазистатического метода предельных состояний построен следующим образом.

На первом этапе с помощью программного комплекса (ПК) выполняют расчет конструктивной системы всего здания (см. рис. 1а) на заданную проектную нагрузку и определяют напряженно-деформированное состояние в элементах всей конструктивной системы.

На втором этапе рассчитывают конструктивную систему по так называемой вторичной расчетной схеме на суммарное нагружение заданной проектной нагрузкой и запроектное воздействие в виде внезапного выключения крайней колонны первого этажа (по оси Б, см. рис. 1б) в соответствии с СТО-008-02495342-2009 «Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий. Проектирование и расчет» и находят перераспределение силовых потоков в конструктивной системе. При этом рассчитанные на

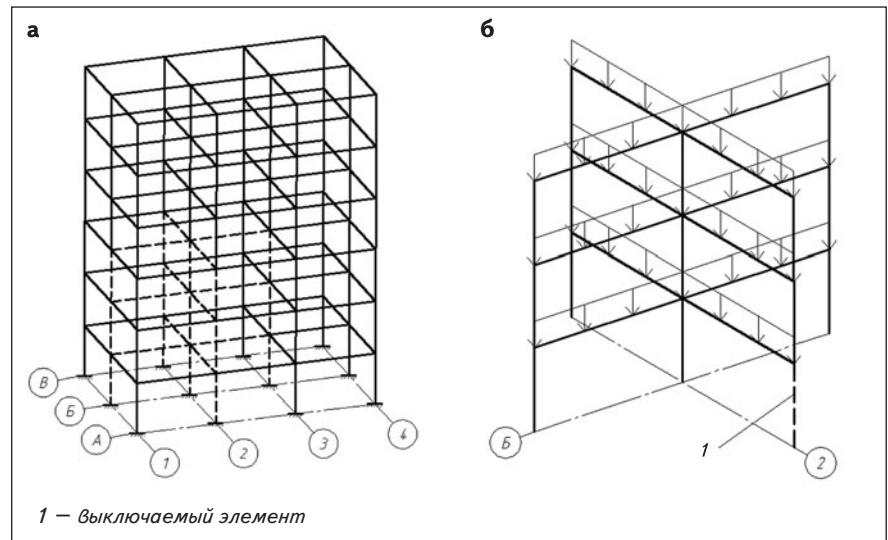


Рис. 1. Расчетные схемы первого (а) и второго (б) уровней железобетонного монолитного многоэтажного здания

первом этапе усилия в колонне во вторичной расчетной схеме прикладывают с обратным знаком и определяют динамические догружения во всех элементах.

По полученному распределению силовых потоков во вторичной расчетной схеме и соответствующим динамическим усилиям проводится критериальная оценка прочности железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям. Затем определяют сечения элементов, в которых достигаются предельные состояния по растянутой арматуре или сжатою бетону.

При достижении элементами хрупкого разрушения по сжатою бетону возникают дополнительные динамические догружения на неразрушенные элементы системы, создавая в них дополнительные динамические усилия. При определении динамических догружений учитывается скорость разрушения конкретного сечения по методике [8].

Эти усилия суммируются с ранее вычисленными по вторичной расчетной схеме, и вновь выполняется критериальная проверка прочности элементов по нормальным и наклонным сечениям, но уже с выключенными из рабо-

ты конструктивной системы разрушенными сечениями. Итерационный расчет конструктивно и физически нелинейной системы продолжается до стабилизации процесса, т. е. до остановки разрушений новых сечений в элементах конструктивной системы (локальное разрушение системы) или до образования геометрически изменяемой системы прогрессирующего разрушения конструктивной системы.

Методика экспериментального исследования. С использованием приведенного алгоритма была рассчитана запроектированная для физического эксперимента двухпролетная трехэтажная железобетонная монолитная рама из бетона класса В15 (рис. 2). Сечение ригелей и колонн принято 50×100 мм. Армирование выполнено вязаными каркасами (кр-1) с симметричным расположением арматуры диаметром 6 мм класса А400С в верхней и нижней зонах сечения.

Такая схема армирования принята для защиты конструкции от прогрессирующего разрушения в случае изменения силовых потоков в раме при внезапном выключении одного из несущих элементов. Поперечная арматура запро-

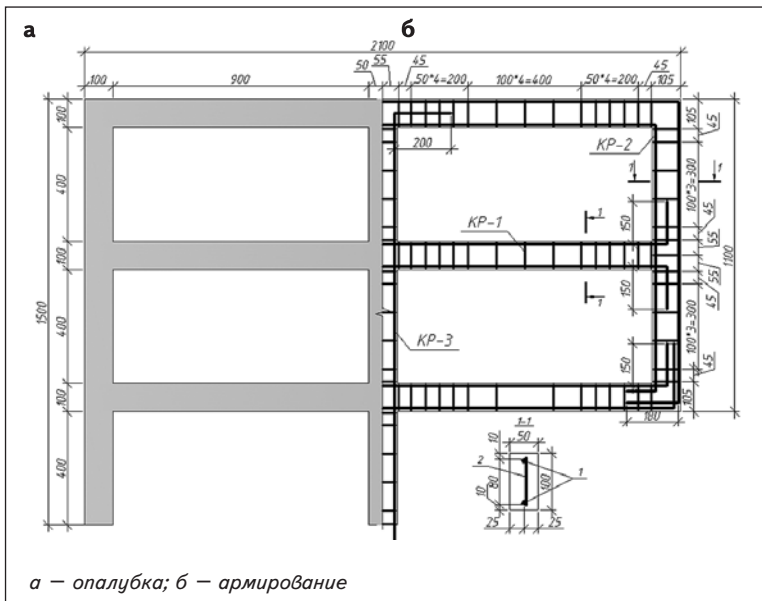


Рис. 2. Схема конструкции рамы

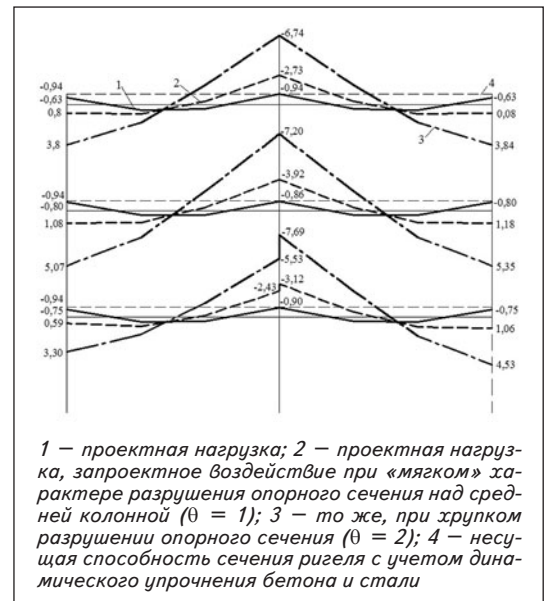


Рис. 3. Эпюры моментов в железобетонной раме

ектирована из проволоки диаметром 1,5 мм с шагом в пролете и колоннах 100 мм и в приопорных сечениях 50 мм.

На первом этапе раму рассчитывали на сосредоточенную нагрузку, приложенную симметрично к ригелям по две силы в каждом пролете на расстоянии 300 мм от колонн.

Проектное значение сосредоточенных сил, равное 3,25 кН (с учетом собственного веса ригелей 0,137 кН/м), назначали исходя из расчетной сосредоточенной нагрузки на ригели 3,75 кН, при которой изгибающий момент в ригелях достигает предельного значения 0,93 кН·м.

На втором этапе раму рассчитывали по вторичной расчетной схеме на суммарное нагружение сосредоточенными проектными силами по 3,25 кН каждая и на запроектное воздействие, вызванное внезапным выключением крайней правой колонны первого этажа. При этом усилия от удаленной колонны в виде продольной силы и изгибающего момента в верхнем сечении колонны прикладывали к ригелю с обратным знаком [8, 10].

Результаты нелинейного расчета в виде эпюр изгибающих моментов в элементах рамы представлены на рис. 3 (усиления в колоннах условно не показаны). В расчете учитывались динамические догружения (коэффициент θ), расчетное значение параметра живучести в момент выключения колонны составило $\lambda = 3,25$.

В соответствии с работами [4, 8] за параметр живучести λ принята нагрузка, при которой в рассматриваемой системе начинается процесс структурных преобразований, вызывающих последовательное изменение ее статической неопределимости от выключения первой связи до превращения системы в изменяемую.

На основе выполненных расчетов разработана методика экспериментальной проверки параметра живучести λ , коэффициента динамических догружений в нагруженной монолитной железобетонной раме при внезапном выключении одного из несущих элементов. Конструкция и геометрические размеры, армирование и класс бетона опытной ра-

мы для физического эксперимента приняты, как для расчетной модели (см. рис. 2).

Опытные конструкции монолитных железобетонных рам изготавливали в неразъемной опалубке из влагостойкой ориентированно-стружечной плиты в горизонтальном положении с виброуплотнением глубинным вибратором (рис. 4а).

Испытания рам проводили на специально разработанном стенде, включающем в себя силовую раму из двух сваренных между собой швеллеров и рычажно-механическую систему нагрузочных устройств в виде тяжелой из швеллеров для передачи опытной нагрузки (см. рис. 4б).

Для создания запроектного воздействия запатентованным способом [11] крайнюю правую колонну выполняли в виде телескопической стойки, состоящей из двух металлических труб, соединенных между собой прокалиброванной шпонкой с фиксированной плоскостью среза.

При достижении сосредоточенной проектной нагрузки на ригели значения 3,25 кН происходило хрупкое разрушение со-

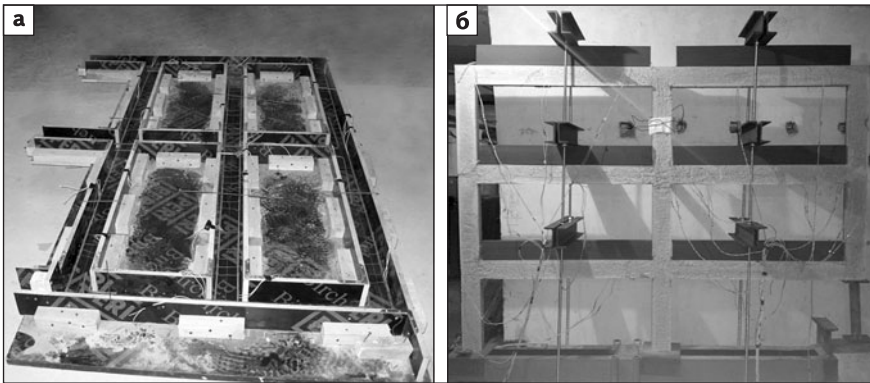


Рис. 4. Общий вид опалубочной формы (а) и испытательного стенда (б)

единительной шпонки в телескопической стойке, вызывая в элементах железобетонной рамы изменения расчетной схемы и динамическое догружение.

Характеристики конструкции железобетонной рамы для оценки параметра ее живучести и коэффициента динамических догрузений регистрировали с использованием тензометрии и оптико-механических приборов.

Тензорезисторы устанавливали в характерных сечениях конструкции в бетоне, на арматуре и выключаемой телескопической стойке (рис. 5).

Перемещения в сечениях рамы измеряли с помощью прогибомеров и индикаторов часового типа с ценой деления от 0,001 и 0,01 мм.

Динамические догрузки в элементах рамы в момент внезапного выключения телескопи-

ческой стойки и время динамического воздействия фиксировали цифровой видеокамерой с частотой не менее 60 Гц [12]. Кроме того, динамическое догружение косвенно оценивали по приращениям ширины раскрытия трещин в элементах рамы до и после запроектного воздействия, а также путем видеофиксации приращений показаний прогибомеров в момент запроектного воздействия.

В процессе испытаний на различных этапах нагружения проектной сосредоточенной нагрузкой регистрировали процесс трещинообразования в элементах рамы и измеряли ширину раскрытия трещин, а в момент приложения запроектного воздействия с помощью видеокамеры фиксировали процесс и характер разрушения в сечениях элементов рамы.

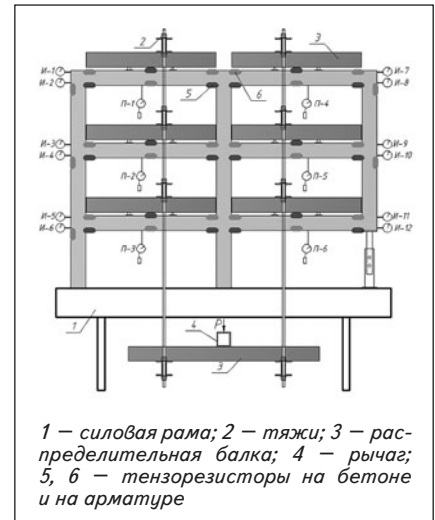


Рис. 5. Схема расстановки тензорезисторов и оптико-механических приборов

Вывод

Разработанный алгоритм моделирования живучести нелинейно деформируемых железобетонных монолитных каркасов многоэтажных зданий и методика экспериментального определения параметра живучести и коэффициента динамических догрузений при внезапной структурной перестройке конструктивной системы позволяют выполнить количественную оценку этих характеристик. Эта методика может быть использована при разработке рекомендаций по защите зданий и сооружений от прогрессирующих разрушений для определения и нормирования параметров их живучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Травуш В. И., Емельянов С. Г., Колчунов В. И. Безопасность среды жизнедеятельности – смысл и задача строительной науки // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 20–27.
2. Колчунов В. И., Скобелева Е. А., Ключева Н. В., Горностаев С. И. Экспериментальные исследования деформативности железобетонных конструкций составного сечения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 1. С. 54–60.
3. Ключева Н. В., Шувалов К. А. Методика экспериментального определения параметров деформирования и разрушения преднапряженных железобетонных статически неопределимых балочных систем в запредельных состояниях // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 61–66.
4. Ключева Н. В., Андросова Н. Б. К построению критериев живучести коррозионно-повреждаемых железобетонных конструктивных систем // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 1. С. 29–34.
5. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanov M. Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state [Критерий трещиностойкости коррозионно-поврежденного бетона в плоском напряженном состоянии] // Procedia Engineering. 2015. Vol. 177. Iss. 1. Pp. 179–185.
6. Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P. On strength

reserve assessment for prismatic folded plate roof structures [К оценке остаточного ресурса призматических складчатых панелей] // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 725–726. Pp. 922–927.

7. Bao Yihai. Macro model-based progressive collapse simulation of reinforced concrete structures [Моделирование процесса прогрессирующего обрушения железобетонных конструкций]. University of California, Davis, 2008. 168 p.
8. Колчунов В. И., Ключева Н. В., Андросова Н. Б., Бухтиярова А. С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М. : АСВ, 2014. 208 с.
9. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // *Промышленное и*

гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.

10. Гениев Г. А., Колчунов В. И., Ключева Н. В., Никулин А. И., Пятикрестовский К. П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М. : АСВ, 2004. 216 с.
11. Ключева Н. В., Бухтиярова А. С. Способ экспериментального определения динамических догрузений в железобетонных рамно-стержневых системах от внезапного выключения линейной связи // Патент России № 2437074. 2011. Бюл. № 35.
12. Ключева Н. В., Бухтиярова А. С., Колчунов В. И., Рыпаков Д. А. Способ экспериментального определения динамических догрузений в железобетонных рамно-стержневых системах от внезапного выключения линейной связи // Патент России № 2547887. 2015. Бюл. № 10.

REFERENCES

1. Travush V. I., Emel'janov S. G., Kolchunov V. I. The safety of living environment – meaning and task of building science. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 7, pp. 20–27. (In Russian).
2. Kolchunov V. I., Skobeleva E. A., Kljueva N. V., Gornostaeв S. I. Experimental investigation of the deformability of concrete structures composite sections. *Stroitel'naja mehanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*, 2008, no. 1, pp. 54–60. (In Russian).
3. Kljueva N. V., Shuvalov K. A. The method of experimental determination of parameters of deformation and fracture of prestressed concrete statically indeterminate beam systems beyond the states. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 11, pp. 61–66. (In Russian).
4. Kljueva N. V., Androsova N. B. To build a criteria of survivability of corrosion-damaged reinforced concrete structural systems. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2009, no. 1, pp. 29–34. (In Russian).
5. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M. Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 177, iss. 1, pp. 179–185.
6. Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P. On strength reserve assessment for prismatic folded plate roof structures. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 725–726, pp. 922–927.
7. Bao Yihai. *Macro model-based progressive collapse simulation of reinforced concrete structures*. University of California, Davis, 2008. 168 p.
8. Kolchunov V. I., Kljueva N. V., Androsova N. B., Bukhtiarova A. S. *Zhivuchest' zdaniij i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdeystvijah* [The survivability of buildings and structures with beyond design influences]. Moscow, ASV Publ., 2014. 208 p. (In Russian).
9. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 2, pp. 28–31. (In Russian).
10. Geniev G. A., Kolchunov V. I., Kljueva N. V., Nikulin A. I., Pjatikrestovskij K. P. *Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri zaproektnyh vozdeystvijah* [Strength and deformability of concrete structures with beyond design influences]. Moscow, ASV Publ., 2004. 216 p. (In Russian).
11. Kljueva N. V., Bukhtiarova A. S. *Sposob eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh sistemakh ot vnezapnogo vyklyucheniya lineynoy svyazi* [The method of experimental determination of the dynamic pogruzheny in reinforced concrete frame-core systems from sudden shutdown of the linear association], patent RF no. 2437074, 2011, byul. 35. (In Russian).
12. Kljueva N. V., Bukhtiarova A. S., Kolchunov V. I., Ry-pakov D. A. *Sposob eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh sistemakh ot vnezapnogo vyklyucheniya lineynoy svyazi* [The method of experimental determination of the dynamic pogruzheny in reinforced concrete frame-core systems from sudden shutdown of the linear association], patent RF no. 2547887, 2015, byul. 10. (In Russian).

Для цитирования: Ключева Н. В., Кореньков П. А. Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 2. С. 44–48.

For citation: Klyuyeva N. V., Koren'kov P. A. Method of experimental determination of parameters of survivability of reinforced concrete frame-rod structural systems. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2016, no. 2, pp. 44–48. (In Russian). ■