

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИВУЧЕСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ**

**THE METHOD OF DETERMINATION OF SURVIVABILITY PARAMETERS  
OF REINFORCED CONCRETE FRAME OF MULTI-STOREY BUILDINGS**

*С.Г. ЕМЕЛЬЯНОВ, Н.В. КЛЮЕВА, П.А. КОРЕНЬКОВ*  
*S.G. EMEL'YANOV, N.V. KLYUEVA, P.A. KORENKOV*

(Юго-Западный государственный университет,  
Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского)  
(South-West State University, V.I. Vernadsky Crimean Federal University)  
E-mail: swsu.ee@gmail.com, klynavit@yandex.ru, kpa\_gbk@mail.ru

*В работе представлен алгоритм расчета живучести зданий текстильной промышленности, выполненных из железобетона. Приведены результаты численных исследований деформирования и разрушения фрагмента каркаса многоэтажного здания при внезапном выключении из него одной из колонн. Даны предложения по защите несущих конструкций каркасов таких зданий от прогрессирующего разрушения при запроектных воздействиях.*

*This paper represents an algorithm for calculating the survivability of the textile industry buildings made up of reinforced concrete. The results of numerical studies of deformation and destruction of multi-storey building fragment frame with a sudden removal of one of the columns are shown. The suggestions for the protection of load-bearing structures of carcasses of such buildings from progressive collapse during the design basis effects are given.*

**Ключевые слова:** железобетонный каркас, прогрессирующее обрушение, живучесть, железобетонные конструкции, запроектные воздействия.

**Keywords:** reinforced concrete frame, progressive collapse, survivability, reinforced concrete structures, action beyond design basis.

Реконструкция производственных объектов различных отраслей промышленности, в том числе текстильных предприятий, построенных в основном в 50-70-х годах прошлого века, в нынешних условиях является основным способом поддержания эксплуатационной пригодности основных фондов этих предприятий, поскольку при строительстве нового предприятия стоимость строительно-монтажных работ составляет 70% всех капитальных вложений, при расширении – около 60%, при реконструкции – порядка 20...30%. Кроме того, ускорение окупаемости капитальных вложений при реконструкции и техническом перевооружении происходит в 2...2,5 раза быстрее, а общие затраты на единицу про-

изводственной мощности в среднем примерно на 30% ниже, чем при новом строительстве [1], [2].

Многоэтажные здания предприятий текстильной промышленности постройки последних десятилетий широко распространены в городах Ивановской, Костромской, Тверской областей и в большинстве своем требуют капитального ремонта или реконструкции (рис.1 – конструктивное решение зданий текстильной промышленности: а) – Большая ивановская мануфактура (АО "БИМ"), б) – Ивановская ПТФ им. Балашова, г. Иваново). После проведения реконструкции здание должно отвечать требованиям действующих норм и ГОСТа 27751–2014. Надежность строи-

тельных конструкций и оснований [3] и требованиям Федерального закона № 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" [4]. Здание или сооружение повышенного уровня ответственности, к которым относятся предприятия текстильной промышленности, необходимо рассчитать на отказ одного из эле-

ментов системы. Должна быть учтена аварийная расчетная ситуация, в том числе предельных состояний при этой ситуации, возникающая в связи с взрывом, столкновением, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций.



а)



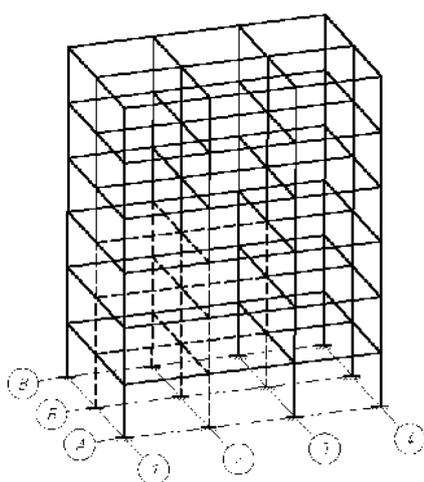
б)

Рис. 1

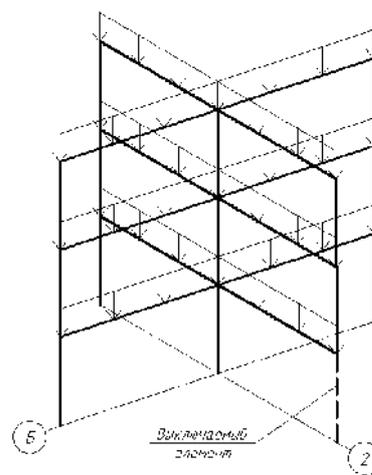
В статье применительно к железобетонным каркасам рассматриваемого типа зданий рассмотрены методика и алгоритм расчета таких объектов на возможные запроектные воздействия в виде внезапного выключения одного из вертикальных несущих элементов (колонны). Расчетные схемы каркаса здания первого (а) и второго (б) уровня железобетонного многоэтажного здания приведены на рис. 2. В ка-

честве проектной нагрузки рассмотрена распределенная поэтажная нагрузка на ригели. Запроектное воздействие принято в виде внезапного выключения из работы колонны первого этажа.

Алгоритм расчета рассматриваемого каркаса с использованием квазистатического метода предельных состояний строится следующим образом.



а)



б)

Рис. 2

На первом этапе с использованием программного комплекса (ПК) производится расчет конструктивной системы всего здания (рис. 2-а) на заданную проектную нагрузку и определяется напряженно-деформированное состояние в элементах всей конструктивной системы.

На втором этапе производится расчет конструктивной системы по так называемой вторичной расчетной схеме на суммарное нагружение заданной запроектной нагрузкой и запроектное воздействие в виде внезапного выключения крайней колонны первого этажа (рис. 2-б) и определяется перераспределение силовых потоков в конструктивной системе. При этом усилия в колонне, определенные на первом этапе расчетного анализа, во вторичной расчетной схеме прикладываются с обратным знаком и вычисляются динамические догружения во всех элементах вторичной расчетной схемы [5].

По полученному распределению силовых потоков во вторичной расчетной схеме и соответствующим динамическим усилиям во всех конструктивных элементах производится критериальная оценка прочности железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям, и определяются сечения элементов, в кото-

рых достигаются предельные состояния по растянутой арматуре или сжатою бетону. В элементах, в которых происходит хрупкое разрушение по сжатою бетону, возникают дополнительные динамические догружения, передающиеся на неразрушенные элементы системы [6...13].

Эти усилия суммируются с ранее вычисленными усилиями во вторичной расчетной схеме, и вновь выполняется критериальная проверка прочности элементов по нормальным и наклонным сечениям, но уже с выключенными из работы конструктивной системы разрушенными сечениями. Итерационный расчет конструктивной и физически нелинейной системы продолжается до стабилизации процесса, то есть до остановки разрушений новых сечений в элементах конструктивной системы – локального разрушения системы или до образования геометрически изменяемой системы – прогрессирующего разрушения конструктивной системы.

С использованием описанного алгоритма была рассчитана двухпролетная трехэтажная железобетонная монолитная рама, конструкция которой представлена на рис. 3 – схема опытной конструкции рамы: а) – опалубка; б) – армирование.

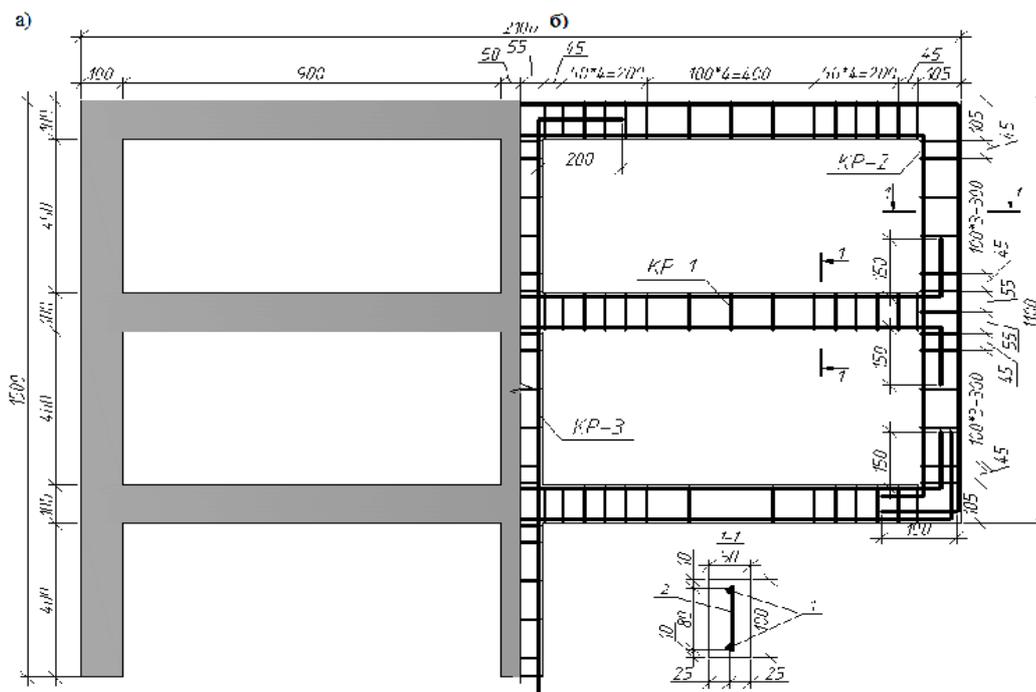


Рис. 3

Выбор для расчетного анализа конструкции рамы обоснован тем, что такая конструкция была запроектирована для проведения физического эксперимента по оценке параметров живучести железобетонных зданий [6] и имеется возможность прямого сопоставления опытных и теоретических результатов. Рама выполнена из бетона класса В15. Сечение ригелей и колонн принято 50×100 мм. Их армирование выполнено вязанными каркасами (КР-1) с симметричным расположением рабочей арматуры в верхней и нижней зоне сечения диаметром 6 мм класса А400С (поз.1). Такая схема армирования принята из соображений защиты конструктивной системы от прогрессирующего разрушения в случае внезапного изменения силовых потоков в конструкции рамы при внезапном выключении одного из несущих элементов. Поперечная арматура (поз. 2) запроектирована из проволоки диаметром 1,5 мм с различным шагом в пролете (100 мм) и опорных сечениях (50 мм). Шаг поперечной арматуры для колонн (см. каркасы КР-2 и КР-3) принят 100 мм.

На первом этапе рама была рассчитана на сосредоточенную нагрузку, приложенную симметрично к ригелям по две силы симметрично в каждом пролете на расстоянии 300 мм от колонн. Проектное значение сосредоточенных сил  $P$ , равное 3,25 кН (с учетом собственного веса ригелей 0,137 кН/м), было назначено исходя из значений расчетной сосредоточенной нагрузки на ригели 3,75 кН, при которой изгибающий момент в ригелях достигает предельного значения 0,93 кН·м.

На втором этапе рама рассчитана по вторичной расчетной схеме на суммарное нагружение сосредоточенными проектными силами  $P$  по 3,25 кН каждая и на запроектное воздействие – вызванное внезапным выключением крайней правой колонны первого этажа. При этом в соответствии с [4], [6] усилия от удаленной колонны в виде продольной силы и изгибающего момента в верхнем сечении колонны прикладываются к ригелю с обратным знаком.

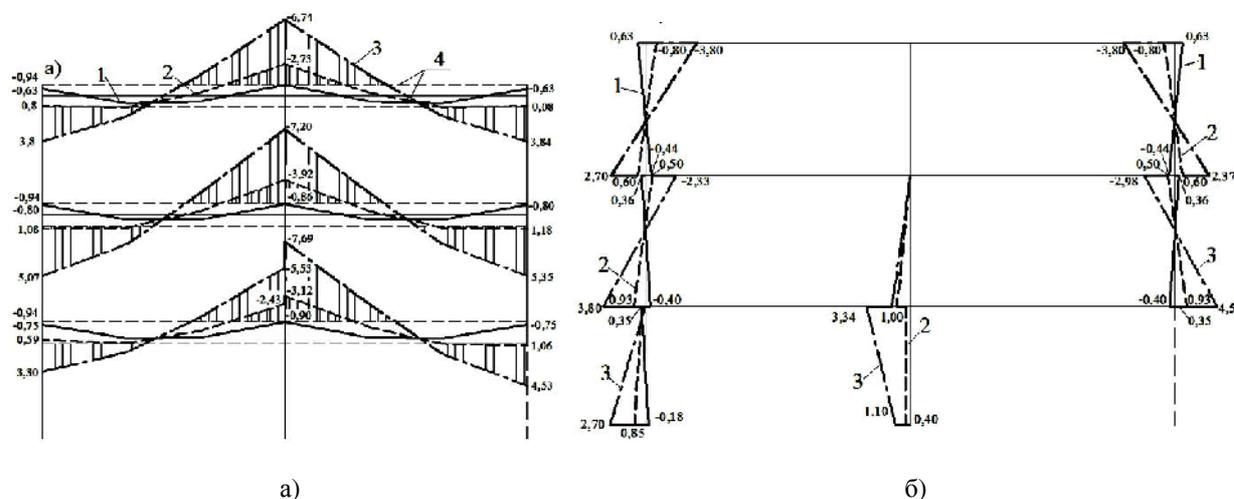


Рис. 4

Результаты физически и конструктивно нелинейного расчета в виде эпюр изгибающих моментов в элементах рамы на первом и втором этапах расчета представлены на рис. 4 (эпюры моментов в ригелях (а) и колоннах (б) железобетонной рамы (кН·м)) (продольные усилия в колоннах на рисунке условно не показаны). В расчете ко-

эффициентом  $\theta$  учитывались динамические догружения, а расчетное значение параметра живучести в момент выключения колонны составило  $\lambda = 3,25$ . В соответствии с [4], [5], [7] за параметр живучести ( $\lambda$ ) принята нагрузка, при которой в рассматриваемой конструктивной системе начинается процесс структурных преобра-

зований, вызывающих последовательное изменение ее статической неопределимости от выключения первой связи до превращения системы в изменяемую [14].

Анализ полученных результатов расчета показал следующее. При действии проектной нагрузки несущая способность ригелей и колонн обеспечены (см. эпюры 1 и 4). При проектной нагрузке, запроектном воздействии и "мягком" (по арматуре) характере разрушения наиболее вероятный характер локального разрушения рамы может быть представлен схемой (рис. 5 – схема локального разрушения рамы при проектной нагрузке, запроектном воздействии и "мягком" характере разрушения опорного сечения ригелей над средними колоннами: 1, 2 – соответственно исходная и деформированная схема). После выключения колонны все ригели правой половины рамы смещаются вниз, по направлению выключенной колонны. На левой половине рамы в опорных сечениях ригелей также возникают разрушения по моменту с образованием пластических шарниров в опорных сечениях ригелей, однако изменяемой системы не образуется.

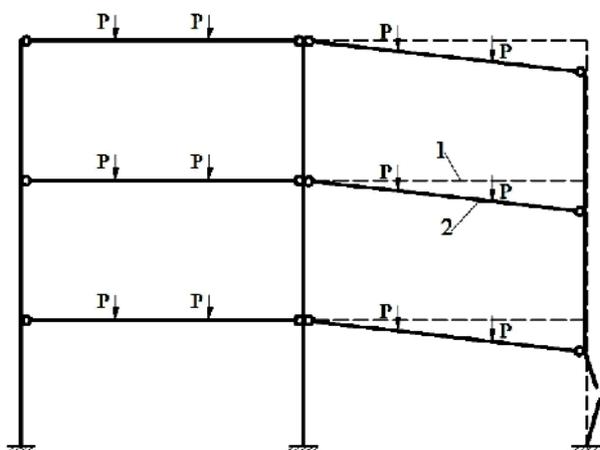


Рис. 5

При проектной нагрузке, запроектном воздействии и хрупком по бетону разрушении наиболее напряженных сечений ригелей по коэффициенту динамических догрузений в сечениях ригелей  $\theta > 1$  происходит прогрессирующее разрушение всей конструкции рамы [6].

Из приведенного анализа следует, что при проектировании и разработке новых проектов усиления существующих многоэтажных зданий с монолитным железобетонным каркасом для обеспечения пластического характера возможных локальных разрушений и соответственно снижения коэффициента динамических догрузений в несущих конструкциях каркаса здания целесообразно двойное расчетное армирование ригелей и колонн.

Такое формирование обеспечивает восприятие меняющихся силовых потоков при внезапном выключении одной из несущих конструкций в каркасе здания и соответственно защиту несущего каркаса от прогрессирующего разрушения [7], [8].

## ВЫВОДЫ

Разработанные методики и алгоритм моделирования живучести нелинейно деформируемых железобетонных монолитных каркасов многоэтажных зданий при структурной перестройке конструктивной системы, вызванной внезапным выключением одной из несущих конструктивных параметров живучести в условиях таких воздействий, позволяют выполнить количественную оценку. Эта методика может быть использована при разработке рекомендаций по защите зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоева О.И. Реконструкция промышленных объектов. – Мн.: БНТУ, 2005.
2. Топчий Д.В. Реконструкция и перепрофилирование производственных зданий. – М.: АСВ, 2008.
3. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Введ. 2015-07-01. – М.: Стандарт-информ, 2015.
4. Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс: Законодательство: Версия Проф. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/) (18.03.2015)
5. Патент России № 2547887. Способ экспериментального определения динамических догрузений в железобетонных рамно-стержневых системах от внезапного выключения линейной связи /

Клюева Н.В., Бухтиярова А.С., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А. Оpubл. 2015, Бюл. №10.

6. *Клюева Н.В., Андросова Н.Б.* К построению критериев живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009, №1. С. 29...34.

7. *Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С.* Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2014.

8. *Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P.* On strength reserve assessment for prismatic folded plate roof structures // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Vol.725-726. P.922...927.

9. *Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanov M.* Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state // Procedia Engineering. – 2015. Vol. 177. Issue 1. P. 179...185.

10. *Гениев Г.А., Колчунов В.И., Клюева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П.* Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2004.

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

12. *Тамразян А.Г.* Снижение воздействия динамической прочности бетона в условиях пожара на несущей способности железобетонных колонн // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Т. 475...476. С. 1563...1566.

13. *Тамразян А.Г., Аветисян Л.А.* Оценка несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамической нагрузке в условиях пожара // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Т. 638-640. С. 62...65.

14. *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.

## REFERENCES

1. *Sysoeva O.I.* Rekonstrukcija promyshlennyh ob'ektov. – Mn.: BNTU, 2005.

2. *Торчій D.V.* Rekonstrukcija i pereprofilirovanie proizvodstvennyh zdaniј. – M.: ASV, 2008.

3. *GOST 27751–2014.* Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye položenija. Vved. 2015-07-01. – M.: Standartinform, 2015.

4. *Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 №384-FZ* "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniј i sooru-

zhenij" [Elektronnyj resurs] // SPS Konsul'tantPljus: Zakonodatel'stvo: Versija Prof. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/) (18.03.2015)

5. *Patent Rossii № 2547887.* Sposob jeksperimental'nogo opredelenija dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh sistemah ot vnezapnogo vyključenija linejnoj svjazi / *Kljueva N.V., Buhtijarova A.S., Kolchunov V.I., Rypakov D.A.* Opubl. 2015, Bjul. №10.

6. *Kljueva N.V., Androsova N.B.* K postroeniju kriteriev zhivuchesti korrozionno povrezhdaemyh zhelezobetonnyh konstruktivnyh sistem // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2009, №1. S. 29...34.

7. *Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Androsova N.B., Buhtijarova A.S.* Zhivuchest' zdaniј i sooruzhenij pri zaproektnykh vozdejstvijah. – M.: ASV, 2014.

8. *Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P.* On strength reserve assessment for prismatic folded plate roof structures // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Vol.725-726. P.922...927.

9. *Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanov M.* Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state // Procedia Engineering. – 2015. Vol. 177. Issue 1. P. 179...185.

10. *Geniev G.A., Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Nikulin A.I., Pjaticrestovskij K.P.* Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri zaproektnykh vozdejstvijah. – M.: ASV, 2004.

11. *Kljueva N.V., Koren'kov P.A.* Metodika jeksperimental'nogo opredelenija parametrov zhivuchesti zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstruktivnyh sistem // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016, №2. S. 44...48

12. *Tamrazjan A.G.* Snizhenie vozdejstvija dinamicheskoy prochnosti betona v uslovijah pozhara na nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh kolonn // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Т. 475...476. С. 1563...1566.

13. *Tamrazjan A.G., Avetisjan L.A.* Ocenka nesushhej sposobnosti vncentrenno szhatyh zhelezobetonnyh jelementov pri dinamicheskoy nagruzke v uslovijah pozhara // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Т. 638-640. С. 62...65.

14. *Bondarenko V.M., Kolchunov V.I.* Koncepcija i napravlenija razvitija teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniј i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdejstvijah // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013, №2. С. 28...31.

Рекомендована кафедрой промышленного и гражданского строительства ЮЗГУ. Поступила 08.04.16.