

Методы расчета и защиты монолитных железобетонных конструкций безригельных каркасов многоэтажных зданий при аварийных воздействиях

А.И. Никулин, С.В. Коуркин

Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова

Аннотация: В статье рассматриваются современные методы защиты несущих конструкций от прогрессирующего обрушения, а также методы их расчета в запредельных состояниях, с целью обеспечения безопасности зданий и сооружений, снижения материального ущерба и сокращения к минимуму человеческих жертв в результате аварийных ситуаций. Основной целью работы является выявление несовершенств существующих методов расчета строительных конструкций против прогрессирующего обрушения, касательно многоэтажных жилых комплексов, для которых свойственны безригельные каркасы, в архитектурном отношении имеющие значительные преимущества, а также выявление неточности применяемых на практике эмпирических формул для определения коэффициентов динамического упрочнения при растяжении и сжатии, что влечет за собой расчет, несоответствующий действительной работе конструкций.

Ключевые слова: безригельный каркас, прогрессирующее обрушение, мероприятия защиты, методы расчета, коэффициент динамичности, коэффициент динамического упрочнения.

Введение

В связи с увеличением числа чрезвычайных ситуаций, о чем свидетельствуют данные, представленные в государственных докладах последних лет «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций», связанных как с природными, так и с техногенными факторами, повлекшими за собой обрушение отдельных конструкций, а иногда и зданий в целом, проблеме обеспечения прочности и деформативности конструкций возводимых объектов при особых воздействиях (взрывах, столкновении транспортных средств с частями сооружений, авариях оборудования, пожарах, землетрясениях, некоторых климатических нагрузках, отказе работы несущего элемента конструкций и т.п.) уделяется все больше внимания в практике научных исследований, а также в области нормативного регулирования при проектировании промышленных и гражданских зданий.

Анализ нормативной базы позволяет отметить, что в России обязательные требования по расчету на устойчивость против прогрессирующего обрушения зданий и сооружений повышенного уровня ответственности (КС-3) были впервые включены в Федеральный закон №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» 30 декабря 2009 г.

В настоящее время, в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», расчет на прогрессирующее обрушение необходимо проводить для зданий и сооружений не только повышенного уровня ответственности (КС-3), но также зданий и сооружений класса КС-2 с массовым нахождением людей.

Так как под объектами с массовым скоплением людей подразумевается одновременное нахождение в них более 500 человек, то к таким зданиям и сооружениям можно отнести многоэтажные жилые комплексы, для которых свойственны безригельные каркасы, в архитектурном отношении имеющие значительные преимущества. Под безригельным каркасом понимается конструктивная система, в которой на несущие колонны (пилоны) без вспомогательных балок-ригелей опираются плоские перекрытия. Данный фактор свидетельствует о том, что необходимо разрабатывать и совершенствовать методы по расчету железобетонных конструкций безригельных каркасов многоэтажных зданий на прогрессирующее обрушение.

Требование по расчету несущих конструкций на устойчивость против прогрессирующего обрушения подразумевает под собой возможность основных конструктивных элементов системы выдержать однократное (импульсное) воздействие сверхкратковременной динамической нагрузки [1].

С целью реализации данного требования на этапе подготовки проектной документации, разработаны и внедрены следующие нормативные

документы: СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» и СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения».

1. Методы защиты строительных конструкций

Для обеспечения безопасности зданий и сооружений, снижения материального ущерба и сокращения к минимуму человеческих жертв в результате аварийных ситуаций, (особое предельное состояние конструкций) необходима разработка соответствующих подходов к исследованию прогнозирования состояния строительных конструкций и зданий в целом.

Особая роль отводится созданию методов расчета, учитывающих видоизменение конструкций при выключении из работы отдельных элементов, связей, креплений и т.п., и синтезу на их основе адаптационных конструктивных систем, исключающих прогрессирующие разрушения.

В настоящее время, в соответствии с анализом нормативной базы и технической литературы, на территории России выделяют три метода защиты несущих конструкций от прогрессирующего разрушения: прямой, вероятностный и косвенный, в то время, как нормы США, в зависимости от уровня социальной ответственности проектируемого объекта, выделяют лишь два метода: прямой и косвенный [2].

Косвенный метод подразумевает под собой разработку на этапе проектирования с последующей реализацией на практике ряда организационных мер по снижению, а также полному предотвращению возможности возникновения аварийных ситуаций без предварительного расчета, к которым относятся: рациональное расположение несущих конструкций (расположение в труднодоступных зонах), устройство дополнительных ограждений, выполнение огнезащитных покрытий,

повышенный контроль за посетителями, отсутствие взрывных, а также химически опасных материалов на территории объекта и т.д.

Помимо этого, п. 9 СП 385.1325800.2018, в зависимости от типа здания: одноэтажные и многоэтажные каркасные здания, крупнопанельные, кирпичные и комбинированные здания, большепролетные здания и сооружения, а также от типа применяемого материала: железобетон, металл и древесина, приводит ряд различных конструктивных мероприятий, направленных на повышение устойчивости конструкций от прогрессирующего разрушения, к основным из которых относятся устройство вертикальных и горизонтальных связей в двух взаимно перпендикулярных направлениях и обеспечение жестких узлов сопряжения несущих конструкций, как минимум в одном направлении, с целью развития пластических деформаций в соединениях.

Вероятностный метод основывается на статистических данных и заключается в количественной оценке вероятности безотказной работы конструкций на протяжении всего срока эксплуатации, где в качестве параметров системы выступают следующие случайные величины расчётных схем: геометрические, деформационные, прочностные, а также действующие на рассматриваемый объект внешние нагрузки.

Прямой метод заключается в выполнении расчета проектируемого здания на особое сочетание нагрузок с целью обеспечения достаточной несущей способности конструктивных элементов и возможности перераспределения внутренних усилий при отказе (отсутствии) одного из элементов. Показательным примером является метод альтернативного пути развития, подразумевающий под собой удаление из расчетной схемы одной из наиболее нагруженных колонн (по первичной расчетной схеме) крайнего или среднего рядов для определения

сопротивляемости прогрессирующему разрешению отдельных элементов, а также конструктивной системы в целом.

2. Методы расчета строительных конструкций в запредельных состояниях

В соответствии с п. 7.2 СП 385.1325800.2018 для обеспечения прочности и деформативности несущих конструкций после однократного (импульсного) воздействия сверхкратковременной динамической нагрузки расчет элементов конструктивной системы выполняют динамическим или квазистатическим методом по первичной и вторичной расчетной схемам.

Динамический метод расчета в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке при запроектных воздействиях описан в трудах Серпика И.Н. [3], а общий вид дифференциального уравнения в рамках динамической постановки задачи имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[M]$ - матрица масс; $[C]$ - матрица затухания для материала конструкции; $[K]$ - глобальная матрица жесткости; $\{F\}$ - вектор узловой нагрузки; $\{u\}$ - вектор узловых перемещений.

Однако, следует учитывать тот фактор, что в настоящее время динамический метод расчета с учетом нелинейности диаграмм работы применяемых материалов строительных конструкций в связи с повышенной трудоемкостью и неточностью в округлении получаемых результатов, остается недоступным на широком уровне для практикующих специалистов, и осуществляется локально в таких расчетных комплексах, как, например, ANSYS AUTODYN, LS-DYNA и ABAQUS.

Квазистатический метод расчета в работах Б.С. Расторгуева и В.О. Алмазова заключается в оценке воздействия динамического эффекта на проектируемую конструкцию через коэффициент динамичности, физический

смысл которого состоит в множителе, на который необходимо увеличить действующую статическую нагрузку в зоне локального разрушения, чтобы получить значения динамического усилия и перемещения. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Данный метод реализован также в американских нормах [4,5], которые основаны на эмпирических формулах, полученных в результате обработки расчетных данных рамно-стержневых систем в расчетных комплексах.

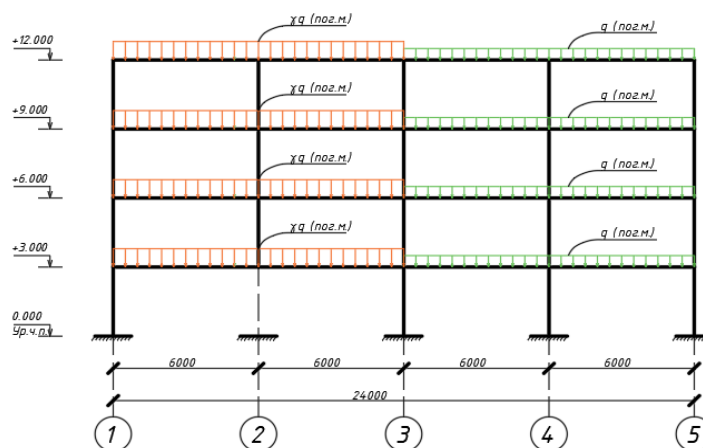


Рис. 1. – Вторичная расчетная схема для квазистатического метода с использованием коэффициента динамичности

Согласно И.Н. Тихонову [6] коэффициент динамичности представляет собой отношение предельной нагрузки, действующей на конструктивный элемент, к нормативной, и определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{q_{ud}}{q}, \quad (2)$$

где q_{ud} – предельная нагрузка на перекрытие с удаленной колонны, пилона или участка стены; q – нормативная постоянная и длительная временная нагрузка.

Однако, Б.С. Расторгуев [7] предлагает вычислять коэффициент динамичности в зависимости от коэффициента пластичности для одноэтажных железобетонных конструкций по формуле:

$$\gamma = \frac{K_{pl}}{K_{pl} - 0.5}, \quad (3)$$

где K_{pl} – коэффициент пластичности, равный отношению полного прогиба элемента к предельному упругому.

Она в дальнейшем была адаптирована В.О. Алмазовым [8] под многоэтажные каркасные здания в предположении, что динамический эффект увеличивается с ростом этажности:

$$\gamma = \frac{K_{pl}}{K_{pl} - 0.5} + \frac{\sum_{i=1}^n (f_{pl,1} - f_{pl,i})}{n \cdot f_{pl,1}}, \quad (4)$$

где $f_{pl,1}$ – пластический прогиб 1-ого этажа; $f_{pl,i}$ – пластические прогибы ригелей i -ого этажа перед разрушением ригеля первого этажа; n – общее количество этажей в каркасе.

Однако, следует также учитывать, что мгновенное проявление сил внутреннего вязкого сопротивления, которые воспринимают внешнее воздействие и приостанавливают развитие деформаций разрушения, обуславливает повышенную ударную прочность бетона.

$$R_{bd} = R_{bn} \cdot K_d, \quad (5)$$

где R_{bn} – нормативное значение сопротивления бетона сжатию; K_d – коэффициент динамического упрочнения, зависящий от класса бетона и скорости нагружения образца.

Так, например, в монографии Ю.М. Баженова [9], для получения зависимости $R_d = f(\tau)$ были испытаны более 500 образцов различных бетонов. Образцы нагружали на пневмодинамических установках, усилия регистрировали с помощью электронной аппаратуры. Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что зависимость коэффициента динамического упрочнения от времени нагружения τ является нелинейной.

Однако, проверка точности эмпирических формул для определения коэффициентов динамического упрочнения при растяжении и сжатии, представленных в работе [9], путём тщательного сопоставления численных результатов и графических данных, приведенных в работе [10] показывает их существенные различия на ряде участков. Для сближения аналитических и опытных данных А.И. Никулин предлагает существующие зависимости изменить следующим образом:

$$K_d = 1.58 - 0.4 \cdot \lg \tau + 0.129 \cdot (\lg \tau)^2 - 0.0149 \cdot (\lg \tau)^3, \quad (6)$$

$$K_{dt} = 1.52 - 0.3895 \cdot \lg \tau + 0.1385 \cdot (\lg \tau)^2 - 0.0192 \cdot (\lg \tau)^3, \quad (7)$$

где τ – время нагружения бетонного образца до его разрушения.

Помимо этого, при проектировании конструкций, воспринимающих особые сочетания нагрузок, согласно работам [11-13], необходимо учитывать тот фактор, что с увеличением класса бетона коэффициент его динамической прочности при сжатии K_d снижается с 2,879 для бетона класса В10 до 1,478 для В100.

Квазистатический метод расчета, в соответствии с рекомендациями СП 385.1325800.2018, состоит из трех последовательных этапов расчета.

Первый этап заключается в создании первичной расчетной схемы, определения и приложения действующих на рассматриваемый объект внешних нагрузок с соответствующими коэффициентами надежности по нагрузке, коэффициентами условия работы.

На втором этапе производится расчет первичной расчетной схемы для определения внутренних усилий в конструктивных элементах системы и выявления наиболее нагруженных из них для каждого сценария запроектного воздействия. Расчетная схема представлена на рис. 2.

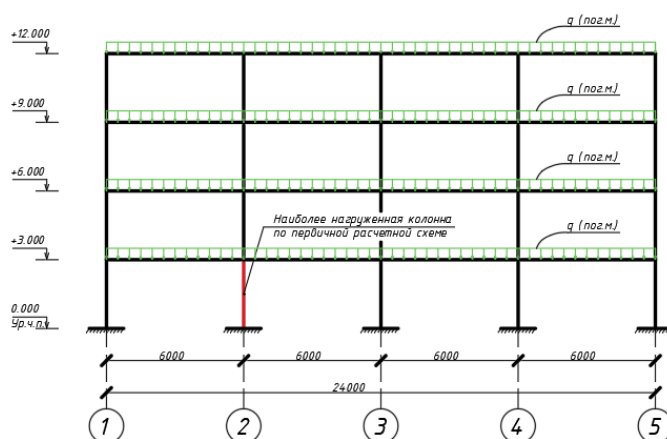


Рис. 2. – Первичная расчетная схема на проектные сочетания нагрузок для определения наиболее нагруженных элементов

На третьем этапе производится расчет вторичной расчетной схемы (после удаления наиболее нагруженного элемента, определённого на втором этапе) с целью определения НДС-элементов конструктивной системы после каждого сценария аварийного воздействия. Для учета динамического догружения расчетной схемы запроектное воздействие учитывается в виде сосредоточенной внешней нагрузки, равной усилию в удаленном элементе, но с противоположным знаком, прикладываемой в зоне удаления несущего элемента. Расчетная схема представлена на рис. 3.

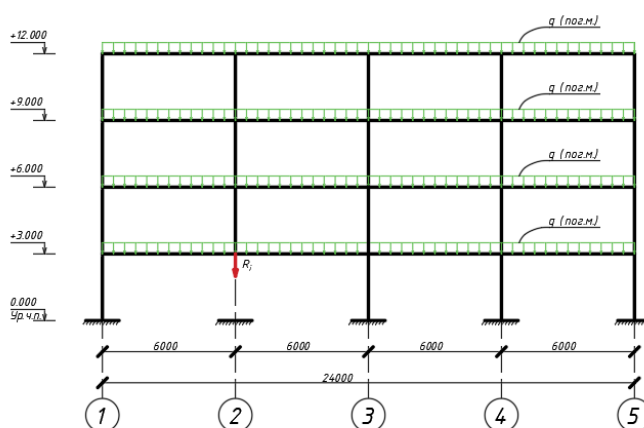


Рис. 3. – Вторичная расчетная схема для квазистатического метода, в соответствии с рекомендацией СП 385.1325800.2018

Заключение

Основываясь на вышеизложенном, выявлено, что большинство задач, связанных с изучением характера деформирования и разрушения железобетонных конструкций при оценке запредельных состояний, имеют по большей части постановочный характер.

Вопрос о возможности защиты конструктивных систем с безригельным каркасом остается открытым, так как в большинстве исследований и рекомендаций приняты, как правило, каркасы с балочными перекрытиями, что приводит к необходимости адаптировать и усовершенствовать существующие методы расчета строительных конструкций на однократное (импульсное) воздействие сверхкратковременной динамической нагрузки под безригельные конструктивные системы (их особенности) с учетом уточненных формул коэффициента динамического упрочнения.

Литература

1. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпяк О.Г, Югов Н.Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. Нортхэмптон-Томск. 2004. - 433 с.
2. Кореньков П.А. Живучесть монолитных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем многоэтажных зданий: дис. канд. тех. наук: 05.23.01 / Симферополь, 2017. – 154 с.
3. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство – 2012. - № 10 – С.49-51.
4. Washington, D.C. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Expansion Projects, prepared by Applied Research Associates for GSA, 2016, 2013 p.

5. Department of Defense USA. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 2009. – 188 p.

6. Тихонов И.Н. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий. Пособие по проектированию. – М. 2007. – 170 с.

7. Расторгуев Б.С. Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность Сооружений – 2003. - № 4 – С.45-48.

8. Алмазов В.О., Зуй К.К. Динамика прогрессирующего обрушения монолитных многоэтажных каркасов. – М.:АСВ, 2013.-128 с.

9. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. - 292 с.

10. Никулин А.И. Прочность бетона при динамическом импульсном растяжении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №6. С.6-10.

11. Никулин А.И., Али Фадиль А.Х. Прочность бетона при импульсном динамическом сжатии с учетом времени нагружения // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2014 С. 92–98.

12. Радченков А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных зданий из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879

13. Таржиманов М.А. Маилян Д.Р. Свойства бетона предварительно напряженных шпунтовых устройств // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/711

References

1. Belov N.N., Kopanica D.G., Kumpjak O.G, Jugov N.T. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij na vzryvnye i udarnye nagruzki [Calculation of

reinforced concrete structures for explosive and shock loads]. Northjemp-ton-Tomsk. 2004. 433 p.

2. Koren'kov P.A. Zhivuchest' monolitnyh zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstruktivnyh sistem mnogojetazhnyh zdaniy [Survivability of monolithic reinforced concrete frame-rod structural systems of multi-storey buildings]: dis. kand. teh. nauk: 05.23.01. Simferopo', 2017. 154 p.

3. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Aleksejcev A.V., Lagutina A.A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo 2012. № 10. P.49-51.

4. Washington, D.C. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines dor New Federal Office Buildings and Major Expansion Projects, prepared by Applied Research Associates for GSA, 2016, 2013 p.

5. Department of Defense USA. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 2009. 188 p.

6. Tihonov I.N. Armirovanie jelementov monolitnyh zhelezobetonnyh zdaniy [Reinforcement of elements of monolithic reinforced concrete buildings]. Posobie po proektirovaniyu. M. 2007. 170 p.

7. Rastorguev B.S. Bezopasnost' Sooruzhenij, 2003. № 4. P.45-48.

8. Almazov V.O., Zuj K.K. Dinamika progressirujushhego obrusheniya monolitnyh mnogojetazhnyh karkasov [Dynamics of progressive collapse of monolithic multi-storey frames]. M.: ASV, 2013.128 p.

9. Bazhenov Ju.M. Beton pri dinamicheskom nagruzhении [Concrete under dynamic loading]. M.: Strojizdat, 1970. 292 p.

10. Nikulin A.I. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2016. №6. P.6-10.

11. Nikulin A.I., Ali Fadil' A.H. Materialy Mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij. Kursk: Kursk. gos. un-t, 2014 P. 92–98.

12. Radchenkov A.V., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879



13. Tarzhimanov M.A. Mailjan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/711