

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ УДАРЕ

Парфенов С.Г., Пикин Д.Ю., Бартенева А.М.
(ФГБОУ ВО «БГИТУ», г. Брянск, Россия)

Вопрос потери устойчивости железобетонных конструкций при авариях, как и моделирование ударных воздействий на конструкции, представляется актуальным. Воздействия различной природы могут привести к потере несущей способности отдельной конструкции и дальнейшему прогрессирующему обрушению всего здания. Учитывая возможность массового нахождения людей и уровень ответственности зданий, необходимо минимизировать риски разрушения несущих конструкций. Представлена оценка устойчивости железобетонной колонны при моделировании различных вариантов горизонтальных ударов, приложение которых изменяется по ее высоте по трем вариантам, зависимости значения критической сжимающей силы, воспринимаемой колонной, от воздействующей горизонтальной ударной нагрузки, а также диапазонов значений интенсивности ударной нагрузки, соответствующих нормальной эксплуатации конструкции для каждого случая. Разработана конечно-элементная модель в программе Femap with NX Nastran, использующая гексаэдрические и стержневые конечные элементы для моделирования, проведения серии опытов и анализа устойчивости конструкции на основе модели Эйлера с учетом положений СП 63.13330.2018.

Несущие железобетонные конструкции зданий могут подвергаться воздействиям различной природы, например, техногенным, таким как удар автомобиля или другой более тяжелой техники на полной скорости или взрывная волна. Согласно классификации, данные нагрузки являются особыми, нормируемыми (проектными). Законодательство устанавливает, что несущие и ограждающие конструкции зданий и сооружений должны быть запроектированы с учетом обоснованных аварийных расчетных ситуаций. При проектировании сооружений должны быть разработаны сценарии реализации наиболее опасных аварийных расчетных ситуаций и разработаны стратегии для предотвращения прогрессирующего обрушения сооружения при локальном разрушении конструкций. Важно понимать, как можно учесть воздействия, перечисленные выше, исследовать устойчивость конструкции и, при необходимости, подобрать оптимальную геометрию сечения, а также материалы конструкции. В данном исследовании выполнена оценка условий, вызывающих потерю устойчивости сжатой железобетонной колонны при действии горизонтального ударного импульса на различных высотах.

В научной литературе одним из часто рассматриваемых вопросов является вопрос устойчивости железобетонных конструкций [1, 2], моделирование ударных воздействий на конструкции [3] и анализ динамического поведения конструкций. Эти вопросы рассматриваются как для отдельных конструкций,

так и для каркасов зданий [4, 5]. К тому же актуальными являются подходы к оптимизации при расчете различных конструкций с оценкой рисков, возникающих при аварийном воздействии [6-9], локальных повреждений конструктивных элементов [10-12], а также предельных состояний, которые при этом могут наступить.

Выбранная для проведения исследования система пре-постпроцессорного анализа Femap на базе решателя NX Nastran позволяет проводить анализ напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Базовые модули позволяют проводить анализ потери устойчивости как в линейной, так и в нелинейной постановке.

В данном исследовании рассмотрена линейная постановка задачи, где не производится учет физической и геометрической нелинейности. Анализ выполнен по модели «buckling» – на основе модели Эйлера. В выбранной программе выполнена модель конструкции железобетонной колонны, полностью отражающая расчетную схему (рисунки 1, 2) и характеристики выбранных материалов (рисунок 3).

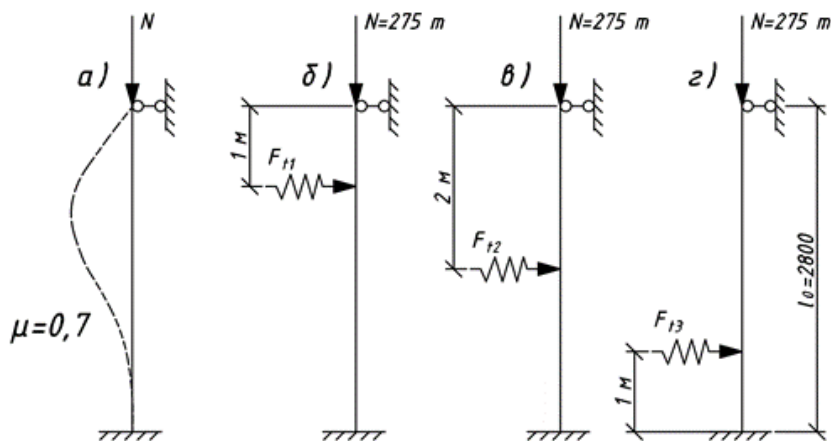


Рисунок 1 – Схемы для расчета: а – форма потери устойчивости сжатого стержня по Эйлеру; б-г – различные случаи загрузки колонны

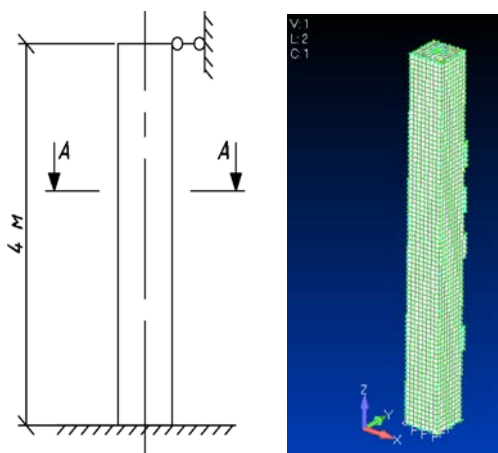


Рисунок 2 – Расчетная схема и КЭ-модель колонны

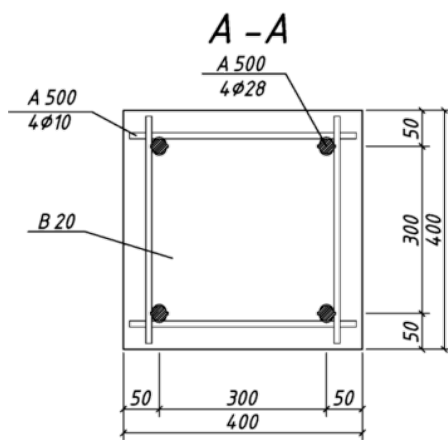


Рисунок 3 – Поперечное сечение колонны

Модель использует различные виды конечных элементов для моделирования разных материалов: континуальные гексаэдрические КЭ для исследования поведения бетона и простейшие конструкционные стержневые элементы для арматуры. Данные виды конечных элементов представлены на рисунке 4.

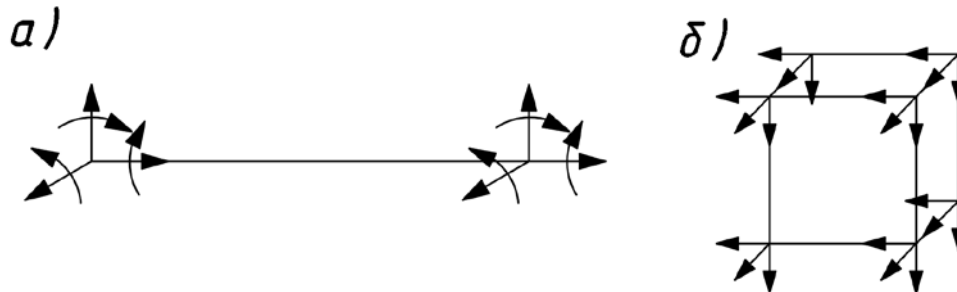


Рисунок 4 – Виды конечных элементов: а – стержневые; б – гексаэдрические

Для выявления зависимости между значениями критической силы и горизонтального воздействия проведем серию испытаний с различными значениями горизонтальной силы для трех различных точек приложения нагрузки по высоте колонны. В ходе испытаний будем отслеживать критическую силу и форму потери устойчивости конструкции, чтобы выявить зоны нормальной эксплуатации конструкции. Обработав полученную информацию, построим графики и дадим сравнительные характеристики для трех различных случаев нагружения.

При проведении исследования будем опираться на положения СП. Значение эксплуатационной нагрузки N , приложенной к колонне, рассчитаем предельное значение продольной силы, которую может воспринять элемент

$$N = \varphi \times (R_b \times A + R_{sc} \times A_{s,tot}), \quad (1)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;
 A – площадь бетонного сечения;
 R_{sc} – расчетное сопротивление арматуры сжатию;
 $A_{s,tot}$ – площадь всей продольной арматуры в сечении элемента;
 φ – коэффициент продольного изгиба.

При расчете критической силы следует уменьшить значение модуля упругости бетона E_b , умножив его на коэффициент k_b

$$k_b = \frac{0,15}{\varphi_l \times (0,3 + \delta_e)}, \quad (2)$$

где φ_l – коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки;
 δ_e – относительное значение эксцентриситета продольной силы.

В рассматриваемом нами случае $k_b = 0,17$. Модуль упругости продольной арматуры E_s , в свою очередь, следует уменьшить на 30 %.

Вначале рассмотрим случай, когда горизонтальный удар приложен на высоте 1 м от верхней опоры. Выполняя серию расчетов с различными значениями горизонтального импульса силы, замечаем, что при значениях менее 10 т·с основной вклад в деформирование конструкции вносит продольная сила N (рисунок 5, а).

Теоретическое значение этой силы по Эйлеру составляет около 2100 т, что говорит об отсутствии потери устойчивости. Разрушение колонны по материалу начинается при значениях нагрузок, соответствующих значению 275 т. При дальнейшем росте значений горизонтальной нагрузки значения критической силы, соответствующей потере устойчивости, уменьшаются.

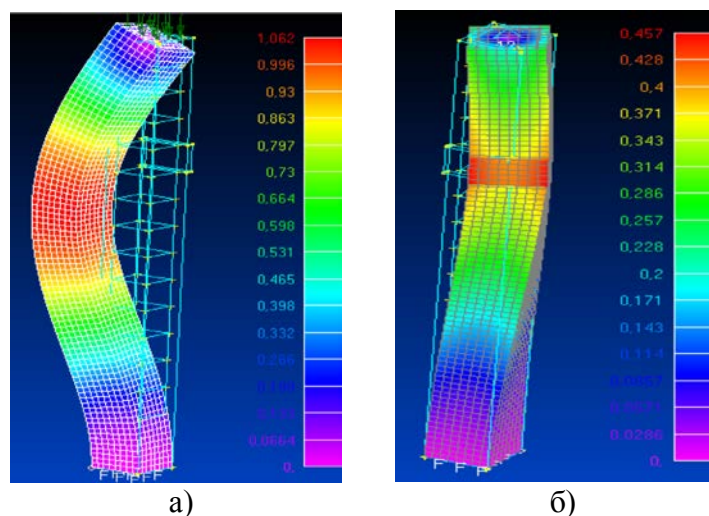


Рисунок 5 – Форма потери устойчивости колонны от действия преимущественно продольной силы N (а) и от совместного действия продольной силы N и ударного воздействия (б)

В качестве динамического воздействия принимается импульс силы, который показан на графике (рисунок 6).

График зависимости значения критической силы от значения импульса силы представлен на рисунке 7.

Расчеты показали, что в рассматриваемом конкретном случае колонна теряет устойчивость при воздействии импульса силы 3075 кН·с. При этом эксплуатационная нагрузка приобретает критическое значение 275 т и возбуждается изгибно-крутильная форма потери устойчивости (рисунок 5, б).

В случае воздействия горизонтального удара на расстоянии 2 м от верхней опоры получим, что горизонтальный удар не влияет на деформирование конструкции при его значениях менее 10 т·с. При воздействии горизонтального удара на середине высоты колонны колонна теряет устойчивость, когда импульс силы достигает 4625 кН·с, форма потери устойчивости аналогична той, что была замечена в первом случае нагружения.

График зависимости значения критической силы от значения импульса силы представлен на рисунках 8, 9.

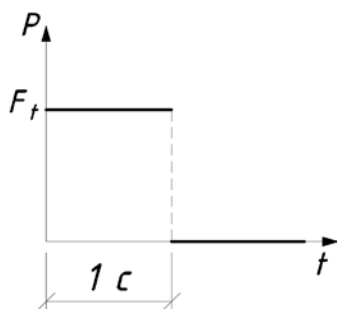


Рисунок 6 – График приложения ударного воздействия

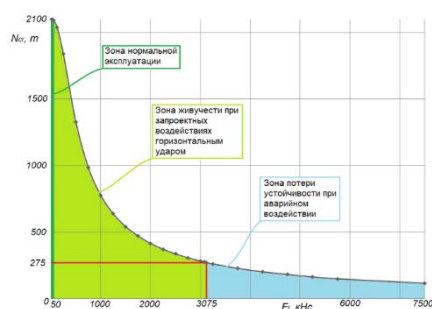


Рисунок 7 – Зависимость критической силы потери устойчивости N_{cr} от величины горизонтального удара, вызванного F_{11}

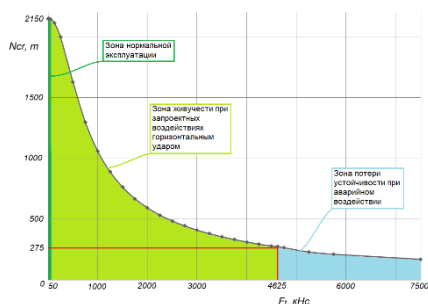


Рисунок 8 – Зависимость критической силы потер устойчивости N_{cr} от величины горизонтального удара, вызванного импульсом F_{12}

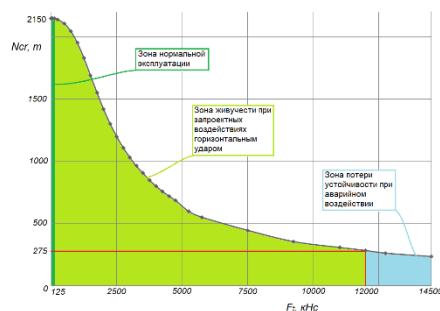


Рисунок 9 – Зависимость критической силы потери устойчивости N_{cr} от величины горизонтального удара, вызванного F_{13}

Исследуя случай приложения горизонтального удара на расстоянии 1 м от нижней опоры, замечаем, что деформирование конструкции при значениях горизонтального удара менее 25 т·с не зависит от него, критическая сила при этом принимает значение 2150 т. В последнем случае загрузки потеря устойчивости колонны происходит при значении горизонтального удара 12000 кН·с.

Заключение

Проведя анализ зависимостей критической Эйлеровой силы от воздействия горизонтального удара для рассмотренных выше случаев приложения нагрузки, а именно, анализируя диапазоны живучести, заметим, что наименее выгодным вариантом нагружения конструкции является первый, когда удар приложен в метре от верхней опоры. Тогда упомянутый выше диапазон является наименьшим из трех рассмотренных случаев. Наиболее выгодным является третий вариант — при горизонтальном воздействии в метре от жесткой заделки колонны. Это выражено в больших диапазонах нормальной эксплуатации конструкции и живучести при запроектных воздействиях. В качестве перспективы дальнейших исследований можно отметить вопрос сравнения с анализом по деформированной схеме. Он учитывает физическую нелинейность в поведении бетона и арматуры, а также геометрическую нелинейность при учете прогибов. Также представляет интерес использование подхода, связанного с оценкой потери устойчивости при запроектных воздействиях, в алгоритмах поиска оптимальных решений для стальных и железобетонных конструкций.

Список литературы

1. К вопросу алгоритмизации задачи расчета живучести железобетонных конструкций при потере устойчивости / В.И. Колчунов [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 52-54.
2. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 012002.
3. Люблинский В.А., Тамразян А.Г. Безопасность несущих систем многоэтажных зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов // В сборнике: Бетон и железобетон – взгляд в будущее. Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в семи томах. 2014. С. 90-99.
4. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14. № 3. Pp. 103-113.
5. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). P. 10306.
6. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // В сборнике: E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. P. 04005.
7. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 7 (91). Pp. 3-15.
8. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12-30.
9. Alekseytsev A., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost minimization for safety enhancing of timber beam structures in historical buildings // В сборнике: E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. P. 03002.
10. Алексейцев А.В. Двухэтапный синтез структурных конструкций с использованием генетического алгоритма и тетраэдризации Делоне // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2013. Т. 9. № 4. С. 83-91.
11. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 45-50.
12. Алексейцев А.В. Поиск рациональных параметров строительных конструкций на основе многокритериальной эволюционной оптимизации // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 18-22.