

Численное моделирование коррозионно-поврежденных колонн при малоцикловом горизонтальном воздействии

М.В. Кудрявцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Статья посвящена проведению численного моделирования в программном комплексе LS DYNA коррозионно-поврежденных железобетонных колонн при малоцикловом горизонтальном нагружении статической нагрузкой. Проведено сравнение численного расчета и экспериментальных данных по исследованию прочности железобетонных колонн с коррозионными повреждениями арматуры на малоцикловую горизонтальную нагрузку.

Ключевые слова: коррозия, арматура, сейсмика, железобетон, коррозионные повреждения, малоцикловая прочность, численное моделирование.

Эксплуатация железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред приводят к развитию коррозионных повреждений арматуры и бетона, что в следствие снижает прочностные характеристики несущих частей зданий и сооружений [1-3]. В процессе коррозии арматуры происходит не только уменьшение диаметра арматуры, но и увеличение в объеме продуктов коррозии, которые в свою очередь приводят к внутреннему избыточному давлению и разрушению защитного слоя бетона [4].

Здания и сооружения могут возводиться в местах с особыми видами воздействий. На территории Российской Федерации более 20% территорий расположены в сейсмоопасных зонах, где сейсмичность строительной площадки более 7 баллов [5, 6]. Согласно нормативно технической документации, все здания и сооружения, строящиеся в сейсмических районах с балльностью выше 7, должны быть рассчитаны на проектные землетрясения [7, 8], также возникает необходимость в оценке их несущей способности с учетом приобретенных коррозионных повреждений в процессе эксплуатации.

Для оценки влияния коррозии на малоцикловую прочность железобетонных сжатых колонн при горизонтальных переменных воздействиях были проведены экспериментальные исследования [9, 10].

По результатам экспериментальных исследований были получены гистерезисные кривые для разных уровней осевого преднагружения ($0,3N_{ult}$ и $0,6N_{ult}$) и процента коррозии арматурных стержней (15% и 30%). На рисунке 1 представлены экспериментальные гистерезисы для серий колонн.

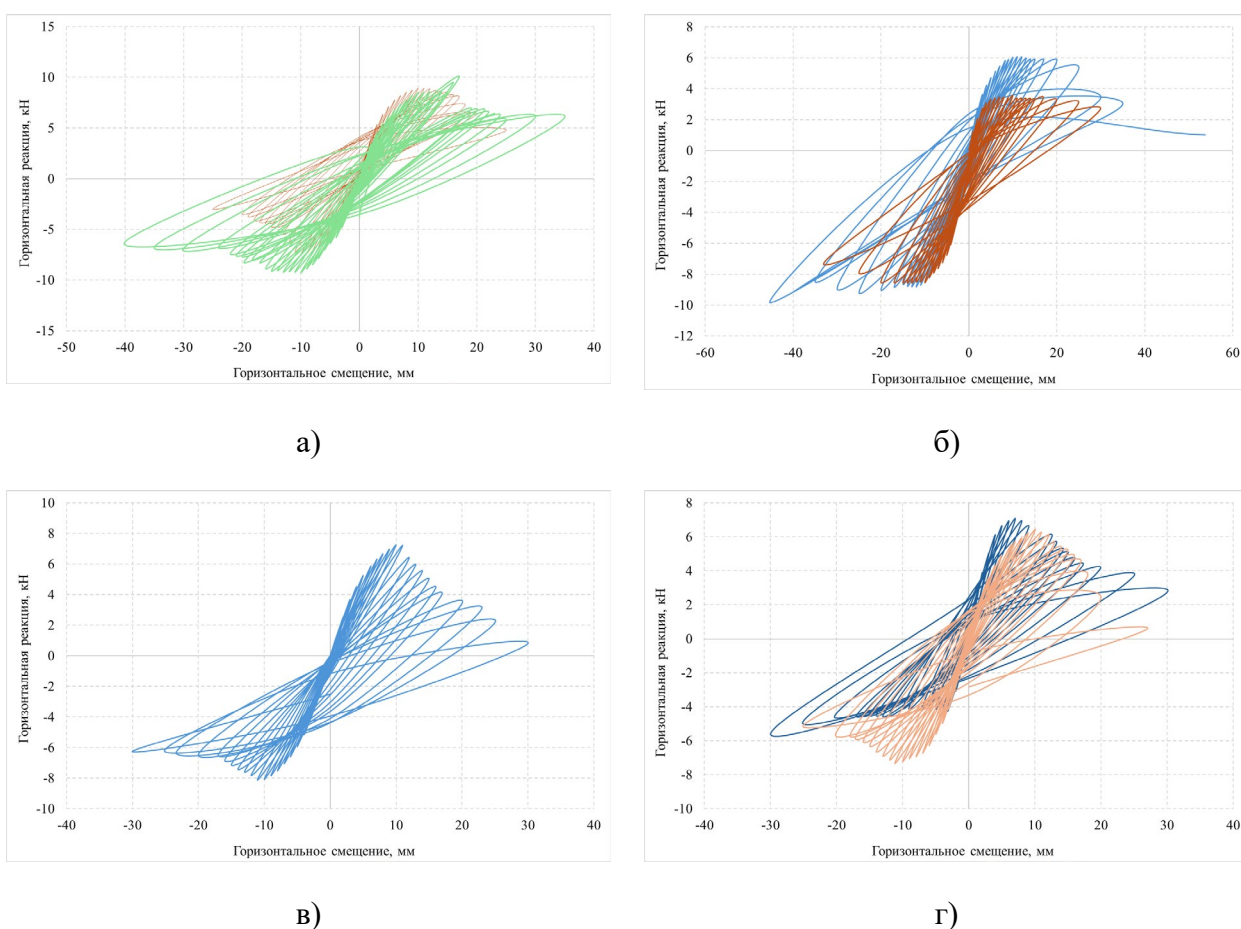


Рис. 1 – Экспериментальный гистерезис колонн после воздействия коррозии: а) уровень нагружения $0,3N_{ult}$ и 15% коррозия; б) уровень нагружения $0,3N_{ult}$ и 30% коррозия; в) уровень нагружения $0,6N_{ult}$ и 15% коррозия; г) уровень нагружения $0,6N_{ult}$ и 30% коррозия.

Валидация расчетной модели реализовывалась в программном комплексе LS DYNA. Моделирование бетона производилось с помощью объемных элементов типа solid с использованием модели материала

Continuous Surface Cap Model (рис. 2), моделирование арматурных стержней производилось с помощью элементов типа beam с использованием модели материала Piecewise Linear Isotropic Plasticity.

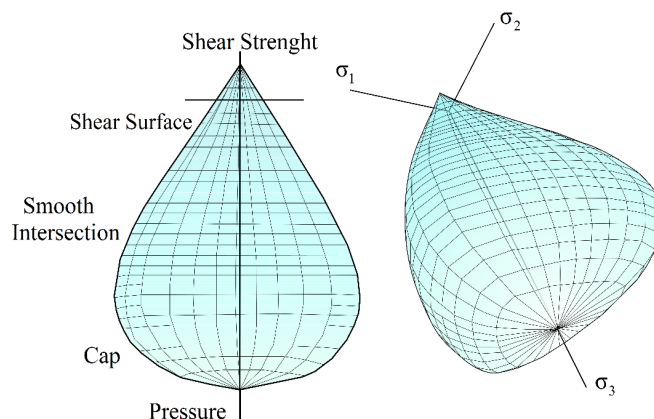


Рис. 2 - Модель бетона Continuous Surface Cap Model

Параметры задания прочности материалов соответствовали экспериментально-определенным характеристикам бетона и корродированных арматурных стержней (рис. 3).

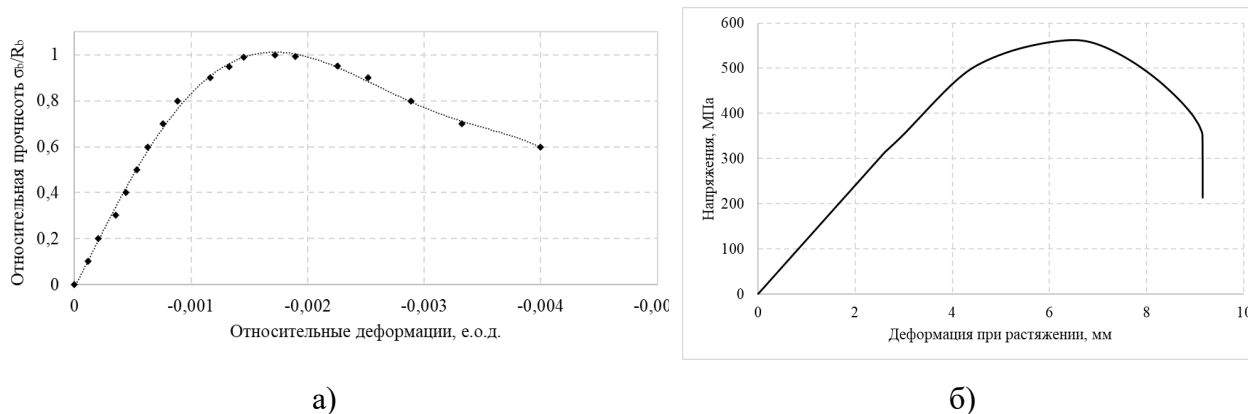


Рис. 3 – Диаграммы деформирования: а) испытания бетонной призмы на сжатие; б) испытание арматуры на растяжение.

Контакт арматуры с бетоном осуществлялся при помощи встроенной функции `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID`, позволяющей учитывать контактное взаимодействие материалов и настраивать их связь.

Нагружение модели осуществлялось в соответствии со схемой испытаний проведенного эксперимента. В LS DYNA задавался пилообразный график нагружения моделей железобетонных колонн (рис. 4).

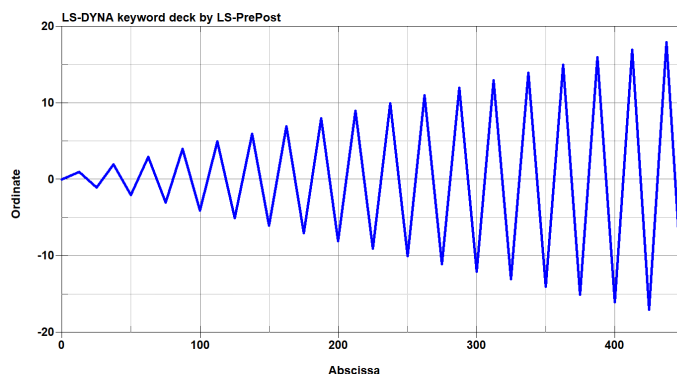


Рис. 4 – Пилообразный закон нагружения моделей колонн.

В ходе проведения расчетов были получены диаграммы «Реакция в колонне, кН – Вынужденное смещение, мм», проанализирован характер накопления повреждений по циклам деформирования и в момент разрушения колонн (рис. 5).

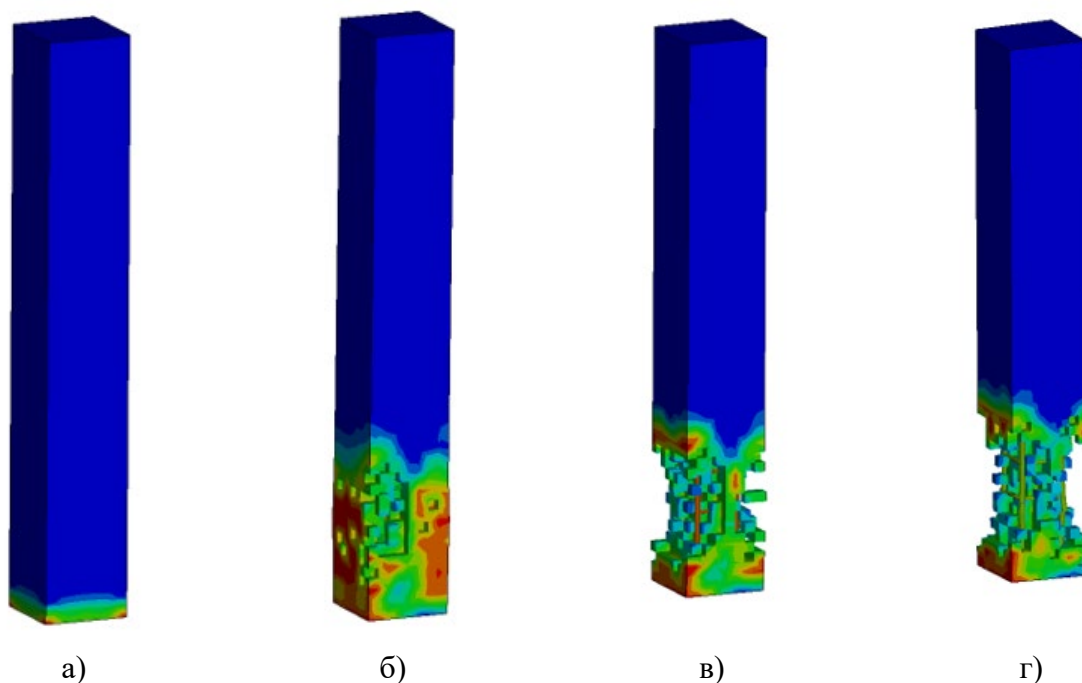


Рис. 5 – Накопление повреждений в колонне при циклическом нагружении:

а) 1 цикл; б) 5 цикл; в) 10 цикл) 15 цикл.

При анализе экспериментального гистерезиса была построена кривая, огибающая пиковые точки гистерезиса в каждом цикле нагружения, которая впоследствии была наложена на результаты численного моделирования (рис. 6).

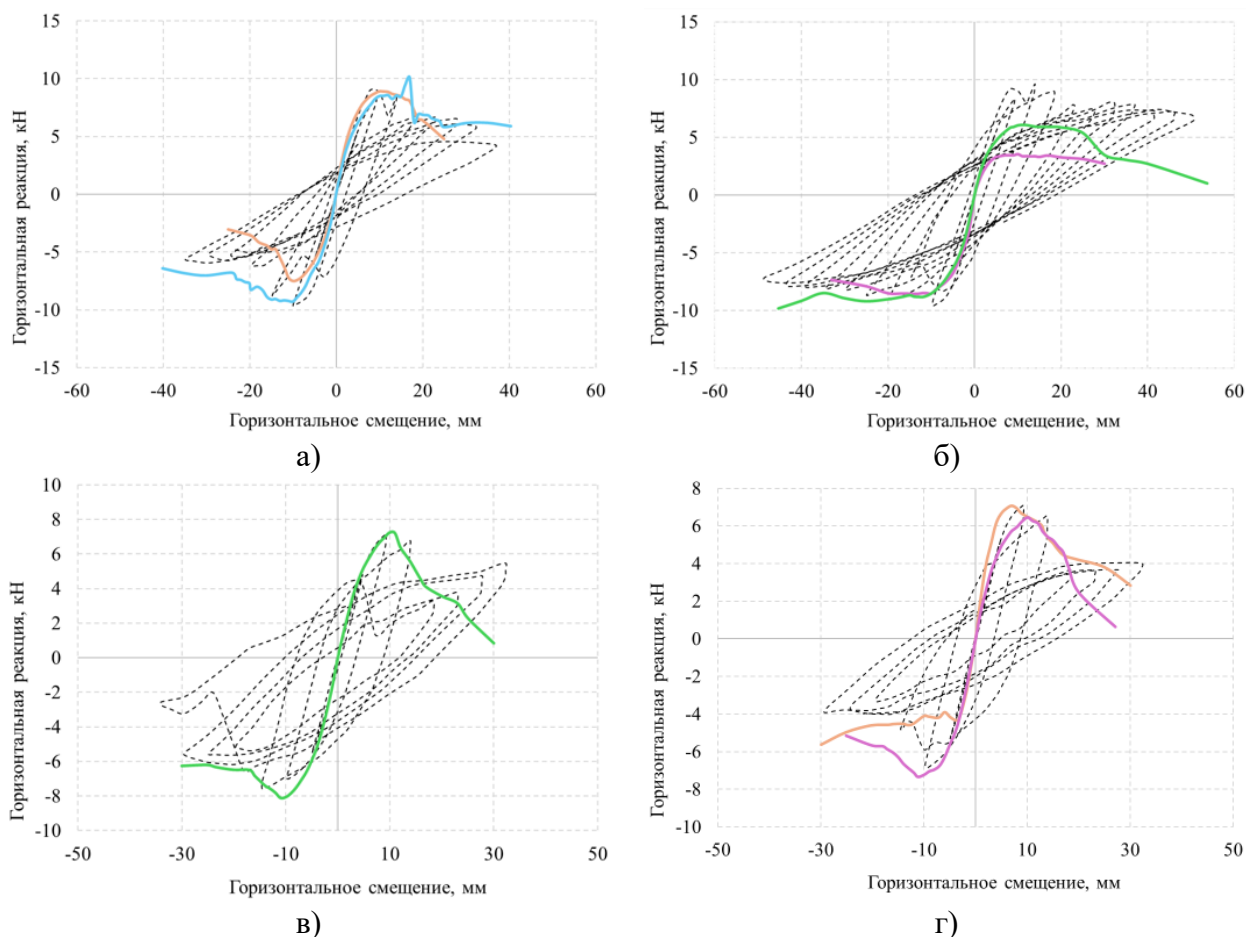


Рис. 6 – Сравнение гистерезиса численного моделирования и экспериментальной огибающей кривой: а) уровень нагружения $0,3N_{ult}$ и 15% коррозия; б) уровень нагружения $0,3N_{ult}$ и 30% коррозия; в) уровень нагружения $0,6N_{ult}$ и 15% коррозия; г) уровень нагружения $0,6N_{ult}$ и 30% коррозия.

На экспериментальной гистерезисной огибающей кривой были выделены характерные точки деформирования колонны в сравнении с результатами численного расчета. По результатам сопоставления погрешность численной модели при пиковой нагрузке составила от 1 до 14%, при этом погрешность расчета при определении деформаций в данной точке составила от 6 до 24%.

Литература

1. Хачиян Э. Е, Мелкумьян М. Г. Сейсмостойкость железобетонных каркасных зданий и метод экспериментального построения характеристик восстанавливающих сил (петель гистистерезисы) при динамических нагружении // Сейсмостойкость сооружений (коллектив авторов). Москва, Наука, 1989. с. 112-135.
 2. Попов, Д. С. Перераспределение усилий в коррозионно-поврежденных статически неопределимых двухпролетных железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7799
 3. Сайед, Й. А. К. Исследование перераспределения моментов в статически неопределимых корродированных железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8955
 4. Минеев, М. С. Исследование параметров сцепления арматуры в бетоне для его оценки при коррозии // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8988
 5. Мкртычев, О. В., Джинчвелашвили Г. А., Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения): Монография. – Москва: Московский государственный строительный университет. ЭБС АСВ, 2014. – 192 с.
 6. Курнавина, С. О., Цацулин И. В., Влияние пластических деформаций на работу изгибаемых элементов при сейсмических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019. – № 5(383). – С. 228-233.
 7. Тамразян А. Г., Черник В. И. Сейсмостойкость железобетонных конструкций после пожара // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2020. С. 123-130.
-

8. Кабанцев О. В., Усеинов Э. С., Шарипов Ш. О методике определения коэффициента допускаемых повреждений сейсмостойких конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2(55). – С. 117-129.

9. Tamrazyan, A. G., Kudryavtsev M. V., Influence of Damage Level on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Structures when Assessing their Seismic Resistance // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2024. – Vol. 20, No. 3. – P. 255-264.

10. Тамразян, А. Г., Кудрявцев М. В., К определению влияния изменения динамических характеристик железобетонных зданий при накоплении повреждений на уровень их сейсмостойкости // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 18 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», – С. 149-155, 2023.

References

1. Xachiyani E. E., Melkumyay M. G. Kniga Sejsmostojkost` sooruzhenij (kollektiv avtorov). Moskva, Nauka, 1989. pp.112-135.
2. Popov, D. S. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2022. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7799
3. Sajed, J. A. K. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2024. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8955
4. Mineev, M. S. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2024. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8988
5. Mkrt'ychev, O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Problemy` ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy` i zabluzhdeniya) [Problems of taking into account nonlinearities in the theory of earthquake resistance (hypotheses and misconceptions)]: Monografiya. Moskva: Moskovskij gosudarstvenny`j stroitel`ny`j universitet. E`BS ASV, 2014. 192 p.

6. Kurnavina, S. O., Czaczulin I. V., Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Tekhnologiya tekstil`noj promy`shlennosti. 2019. № 5(383). pp. 228-233.
7. Tamrazyan A. G., Chernik V. I. Bezopasnost` stroitel`nogo fonda Rossii. Problemy` i resheniya. 2020. pp. 123-130.
8. Kabancev O. V., Useinov E`. S., Sharipov Sh. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. 2016. № 2(55). pp. 117-129.
9. Tamrazyan, A. G., Kudryavtsev M. V., Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2024. Vol. 20, No. 3. pp. 255-264.
10. Tamrazyan, A. G., Kudryavcev M.V. Bezopasnost` stroitel`nogo fonda Rossii. Problemy` i resheniya: materialy` Mezhdunarodny`x akademicheskix chtenij, Kursk, 18 noyabrya 2023 goda. Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga», 2023, pp. 149-155.

Дата поступления: 9.04.25

Дата публикации: 25.05.25