



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2026.3.5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Расчет несущей способности коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при сейсмическом воздействии

А.Г. Тамразян*, М.В. Кудрявцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
Москва, Российская Федерация

* tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: сейсмостойкость, коррозия арматуры, железобетонные колонны, несущая способность, малоцикловое нагружение, гистерезис, численное моделирование, LS-DYNA

История статьи

Поступила в редакцию: 23.06.2026

Доработана: 28.06.2026

Принята к публикации: 30.06.2026

Для цитирования

Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Расчет несущей способности коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при сейсмическом воздействии // Железобетонные конструкции. 2026. Т. 15. № 3. С. 5–14.

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки сейсмостойкости зданий с дефектами, вызванными коррозией арматуры, для предотвращения их разрушения при сейсмических воздействиях. Наиболее распространенным дефектом железобетонных конструкций являются коррозионные повреждения рабочей арматуры, которые не только снижают несущую способность, но и изменяют динамические характеристики конструкций. Цель работы — разработка методики расчета несущей способности коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при знакопеременном малоцикловом нагружении. В качестве материалов и методов использовались аналитический обзор, экспериментальные исследования образцов колонн с различной степенью коррозии арматуры, а также численное моделирование в программном комплексе LS-DYNA. Результаты включают разработанную методику расчета огибающей гистерезиса, экспериментальные данные по снижению прочности, жесткости и диссипативных свойств колонн, а также верификацию предложенного метода. Выводы подтверждают, что коррозия арматуры приводит к значительному снижению динамических и прочностных характеристик элементов, а предложенная методика позволяет с достаточной точностью оценивать их несущую способность при сейсмических воздействиях.

Calculation of the Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Compressed Reinforced Concrete Elements under Seismic Action

A.G. Tamrazyan*, M.V. Kudryavtsev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

* tamrazian@mail.ru

Ашот Георгиевич Тамразян, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

Максим Владимирович Кудрявцев, кандидат технических наук, преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 2543-0639, E-mail: KudryavtsevMV@mgsu.ru

© Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: seismic resistance, reinforcement corrosion, reinforced concrete columns, bearing capacity, low-cycle loading, hysteresis, numerical simulation, LS-DYNA

Article history

Received: 23.06.2026

Revised: 28.06.2026

Accepted: 30.06.2026

For citation

Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V.
Calculation of the Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Compressed Reinforced Concrete Elements under Seismic Action. *Reinforced concrete structures*. 2026; 3(15):5-14.

Abstract. The relevance of the study is due to the need to assess the seismic resistance of buildings with defects caused by reinforcement corrosion to prevent their destruction under seismic impacts. The most common defect in reinforced concrete structures is corrosion damage of the working reinforcement, which not only reduces the bearing capacity but also changes the dynamic characteristics of structures. The aim of the work is to develop a method for calculating the bearing capacity of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under alternating low-cycle loading. Materials and methods include an analytical review, experimental studies of column samples with varying degrees of reinforcement corrosion, and numerical simulation in the LS-DYNA software package. The results include a developed method for calculating the hysteresis envelope, experimental data on the reduction of strength, stiffness, and dissipative properties of columns, as well as verification of the proposed method. The conclusions confirm that reinforcement corrosion leads to a significant decrease in the dynamic and strength characteristics of elements, and the proposed method makes it possible to assess their bearing capacity under seismic actions with sufficient accuracy.

ВВЕДЕНИЕ

Около четверти территории РФ относится к сейсмоопасным районам. Значительная доля эксплуатируемого здесь жилого и промышленного фонда проектировалась по нормам, предшествовавшим актуализированному районированию ОСП-2015, из-за чего расчетная сейсмическая нагрузка для таких объектов была занижена на 1–3 балла. К этому добавляется длительное агрессивное воздействие среды, вызывающее необратимую деградацию бетона и арматуры. В итоге совместное действие этих факторов создает реальные риски для несущей способности, долговечности и безопасной эксплуатации конструкций.

Среди многочисленных дефектов железобетона лидирующее место занимает коррозия рабочей арматуры. Она инициирует цепь взаимосвязанных процессов: рост коррозионных отложений сопровождается расклинивающим эффектом, разрушающим защитный бетон; параллельно сокращается поперечное сечение стержней; оголенные участки теряют сцепление по контакту с бетоном. В результате ухудшаются не только прочностные, но и динамические параметры — снижается жесткость, меняются частоты собственных колебаний, что напрямую влияет на сейсмический отклик [1]. Изменение динамических характеристик конструкций влияет на оценку сейсмостойкости зданий при расчете по акселерограммам на доминантные частоты колебаний.

Проблематика исследования заключается в отсутствии детального изучения напряженно-деформированного состояния сжатых железобетонных элементов, подверженных коррозии продольной рабочей арматуры, в условиях горизонтального сейсмического воздействия. Исследованиям работы железобетонных коррозионно-поврежденных элементов посвящены работы М.В. Берлинова, М.Н. Берлиновой, В.М. Бондаренко, В.И. Колчунова, Т.А. Мацевич, С.И. Меркулова, Д.С. Попова, А.А. Прокоповича, Г.А. Смоляго, А.Г. Тамразяна, Н.В. Федоровой и др. [2–13]. Изучением сейсмостойкости железобетонных конструкций занимались отечественные и зарубежные ученые Я.М. Айзенберг, А.В. Грановский, В.И. Жарницкий, О.В. Кабанцев, В.И. Колчунов, О.В. Мкртычев, А.Г. Тамразян, Хачиян и др. [14–21].

Ashot G. Tamrazyan, Corresponding Member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; E-mail: Tamrazian@mail.ru

Maxim V. Kudryavtsev, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Lecturer at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2543-0639, E-mail: KudryavtsevMV@mgsu.ru

Анализ работ показывает, что существующие методики, как правило, ориентированы на статические или ударные нагрузки, либо не учитывают комплексное влияние коррозии на сцепление арматуры с бетоном и гибкость стержней при циклическом нагружении. Исходя из анализа экспериментальных и теоретических исследований отечественной и зарубежной литературы выявлена проблематика в отсутствии более детального изучения НДС сжатых железобетонных элементов, подверженных коррозии продольной рабочей арматуры в условиях горизонтального сейсмического воздействия.

Целью выполнения исследований является разработка методики расчета несущей способности коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при знакопеременном малоцикловом (типа сейсмических) нагружении.

МЕТОД

Для достижения поставленной цели был использован комплекс методов, включающий аналитический, экспериментальный и численный подходы.

Аналитический метод. Разработана методика расчета огибающей кривой гистерезиса внецентренно сжатой железобетонной колонны (рис. 1) [22, 23]. В основе метода лежит определение характерных стадий работы колонны: стадия трещинообразования, граница упругопластической работы, исчерпание пластического резерва и момент разрушения. Для каждого из этих этапов вычисляются не только силовые параметры (M_{cr} , M_y , M_{pl} , M_u), но и сопутствующие горизонтальные смещения вершины колонны (Δ_{cr} , Δ_y , Δ_{pl} , Δ_u), что позволяет построить полную кривую деформирования.

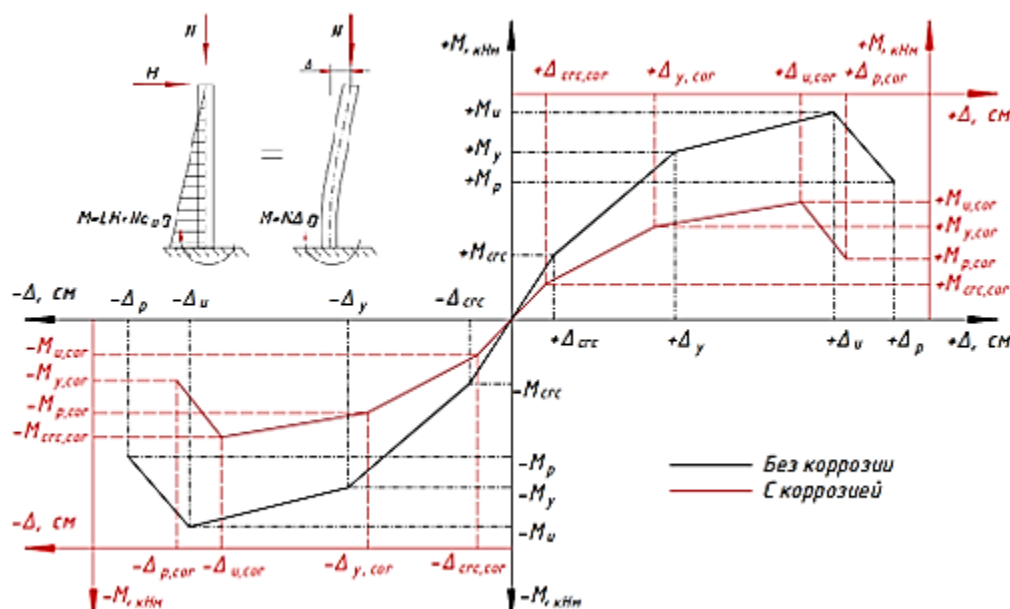


Рис. 1. Расчетная огибающая несущей способности колонны

Fig. 1. Design skeleton bearing capacity curve for column

Расчетная схема колонны представлена в виде консоли с жесткой заделкой в основании и действием горизонтальной силы и постоянной вертикальной нагрузки. При этом в расчет вводятся следующие уточнения и упрощения:

- эпюра деформаций нормального сечения принимается билинейной вследствие нарушения сцепления арматуры с бетоном и возможного проскальзывания стержня;
- высота сжатой зоны с учетом снижения сцепления коррозионно-поврежденной арматуры с бетоном принимается трапецевидной;
- для колонны, ограниченной поперечными хомутами, принята прочность ограниченного бетона;

- влияние геометрической нелинейности, вызванной продольным изгибом при действии осевой нагрузки, учитывается с помощью коэффициента η по нормативной методике;
- при определении момента трещинообразования не учитывается вклад бетона вокруг коррозионно-поврежденной арматуры;
- при определении пластического момента защитный слой бетона считается частично разрушенным, а усилие в сжатых оголенных арматурных стержнях определяется из условия устойчивости.

Предлагаемый алгоритм расчета огибающей гистерезиса базируется на последовательном определении четырех ключевых состояний колонны:

1. Момент образования трещины определяется по формуле:

$$M_{cr} = W_{pl}R_{bt} + Nr, \quad (1)$$

где W_{pl} — пластический момент сопротивления сечения; R_{bt} — расчетное сопротивление бетона растяжению; N — продольная сила; r — расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки [1].

Момент трещинообразования определяется по расчетным сечениям с исключением из расчета бетона в зоне коррозионно-поврежденных стержней (рис. 2).

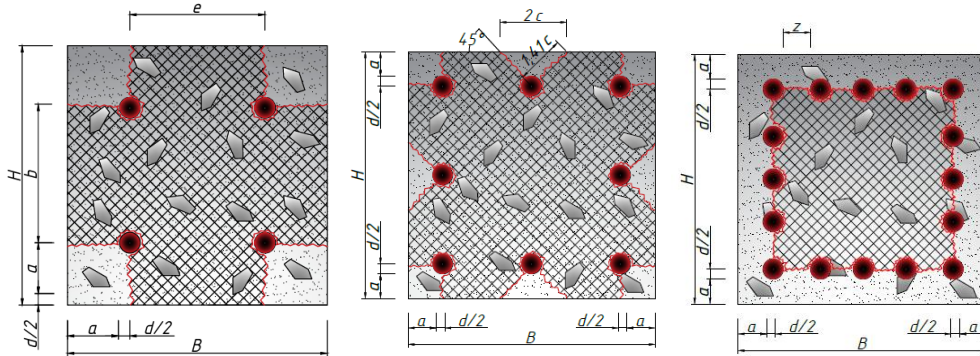


Рис. 2. Схемы к определению поперечного расчетного сечения
Fig. 2. Schemes determining design cross-section

2. Момент перехода из упругой работы в пластическую:

$$M_y = R_b e c \left(h_0 - \frac{c}{2} \right) + R_b (B - e) (x_\phi - c) \left((h_0 - a') - \frac{(x_\phi - c)}{2} \right) + \\ + R'_b e (x_\phi - c) \left((h_0 - a') - \frac{(x_\phi - c)}{2} \right) + v_s \varepsilon_{s,cor} E_{s,cor} A'_s \theta \left(\frac{\xi_m - c/h_0}{1 - \xi_m} \right) (h_0 - c). \quad (2)$$

Высота сжатой зоны определяется как:

$$x = \beta x_m, \quad (3)$$

где переходный коэффициент β , учитывающий снижение сцепления бетона с арматурой, определяется по формуле:

$$\beta_0 = 1 - (1 - \beta)^2. \quad (4)$$

Для уточнения средней высоты сжатой зоны бетона используются коэффициенты, отвечающие за снижение сцепления арматуры с бетоном:

$$\alpha_{st} = \frac{\varepsilon_{st} E_{s,cor}}{\sigma_b}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{st} = \frac{\tau_{cor} l_\tau}{d_{s,cor} E_s}, \quad (6)$$

$$k_s = \frac{l_\tau}{nl_{crc}}. \quad (7)$$

Параметр касательного сцепления коррозионной арматуры с бетоном τ_{cor} принимается по экспериментальным данным.

Для перехода от билинейной эпюры деформаций к традиционной для возможности расчета по методу предельных усилий используется коэффициент деформации сечения:

$$\theta = \frac{v_s \mu \alpha (1 - \xi_m)}{v_b \omega \beta (\xi_m^2) + n_s' k_s + v_s' \alpha \mu'}. \quad (8)$$

3. При определении предельного пластического момента M_{pl} сжатая арматура учитывается из условия потери устойчивости сжатого стержня, при расчетной длине, равной длине пластического шарнира. Усилие в сжатых арматурных стержнях определяется по критерию устойчивости Эйлера:

$$N_{cr} = n\pi^2 E_{sec} I / l^2. \quad (9)$$

Условие прочности имеет запись вида формулы (2) с заменой четвертого слагаемого на сумму усилий сжатых стержней по формуле (9).

4. Момент при полной потере несущей способности (M_u) определяется по эмпирическим зависимостям, выведенным на основе проведенных экспериментальных исследований:

$$M_u = (\gamma C^2 - \delta C + 0,8) M_{pl}; \quad (10)$$

$$M_u = (\gamma C^2 - \delta C + 0,8684) M_{pl}. \quad (11)$$

Формула (9) справедлива при уровне относительного осевого обжатия 0,3, а формула (11) при уровне обжатия 0,6. Значения в промежуточном диапазоне допускается определять интерполяцией. Параметры γ и δ — экспериментальные коэффициенты, определяемые по формулам (12) и (13):

$$\gamma = -0,0003 \left(\frac{N}{N_{ult}} \right) - 0,0003, \quad (12)$$

$$\delta = 0,0153 \left(\frac{N}{N_{ult}} \right) - 0,0086. \quad (13)$$

Экспериментальный метод. Были проведены испытания железобетонных колонн, подверженные ускоренной коррозии арматуры (рис. 3).

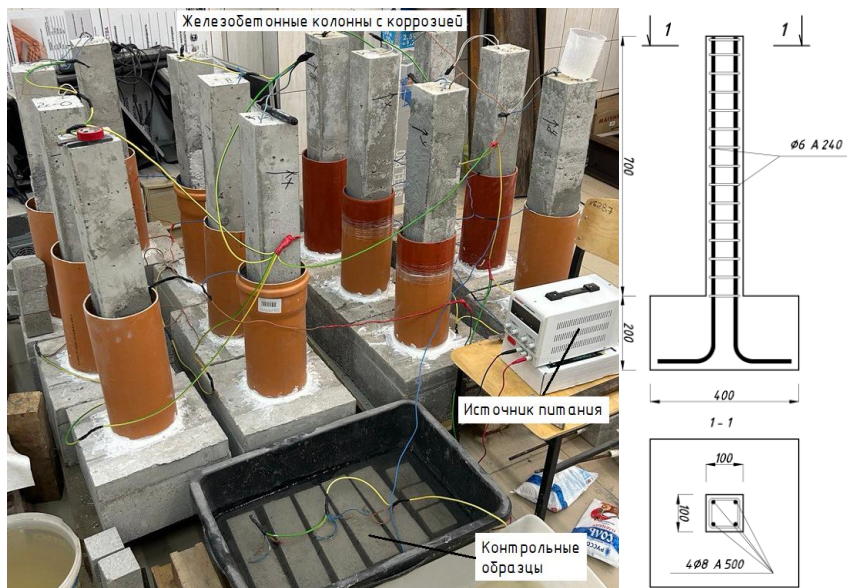


Рис. 3. Экспериментальные колонны
Fig. 3. Experimental specimens of columns

Циклические испытания образцов выполнялись по протоколу ACI 374.2R-13 [13], моделирующему сейсмический режим нагружения. Экспериментальный стенд был развернут в аккредитованной лаборатории НИИЭМ ЛИСМИиК при НИУ МГСУ. По итогам зафиксированы полные петли гистерезиса для каждой серии колонн, которые легли в основу верификации расчетных моделей (рис. 4) [22]. Серии образцов были разделены по факторам относительного продольного сжатия 0,3 и 0,6, а также проценту коррозионного повреждения арматуры – 0, 15 и 30 %, о чем свидетельствует маркировка образцов.

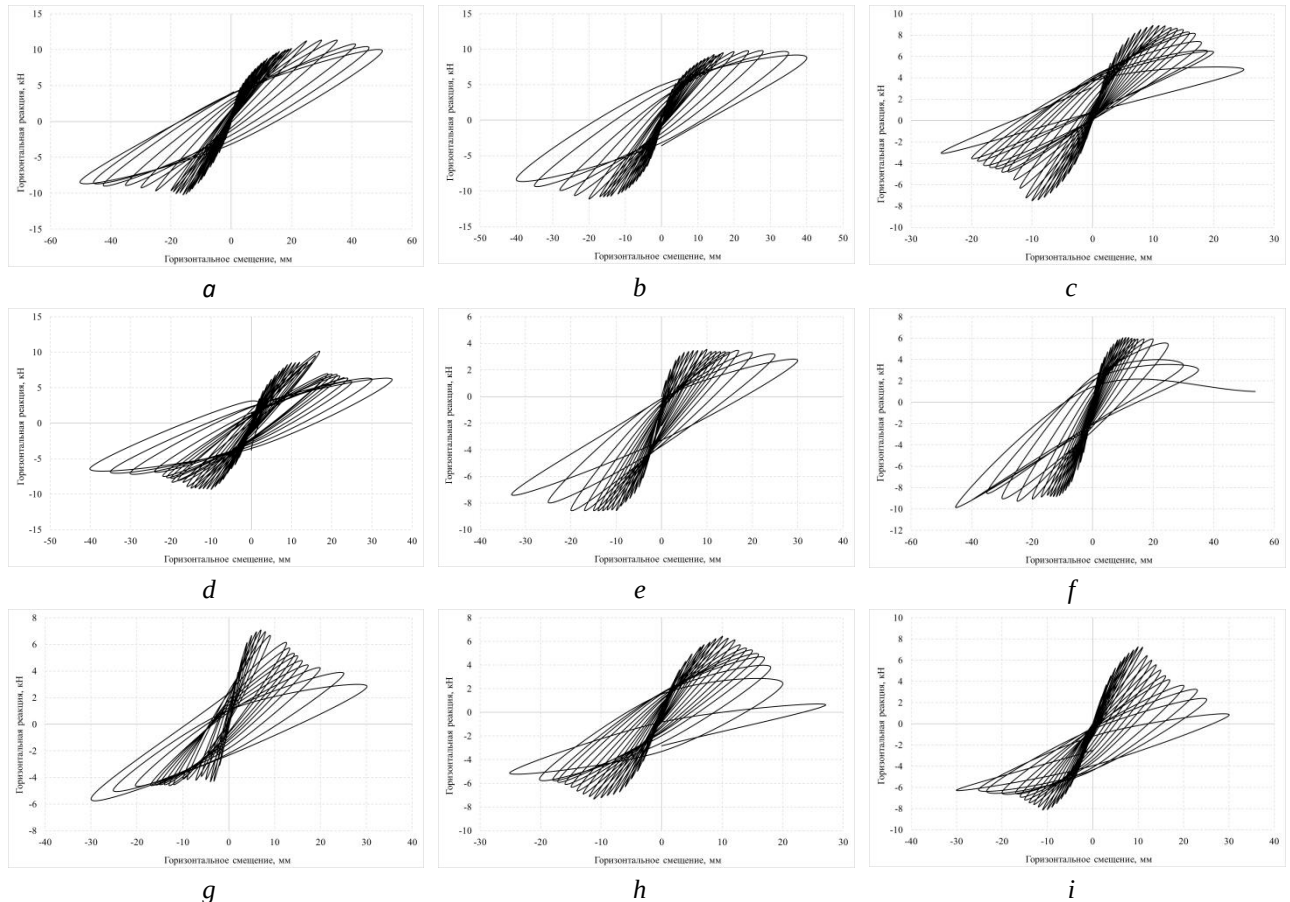


Рис. 4. Диаграммы гистерезиса экспериментальных колонн:

a — Ц-0,3-0; *b* — Ц-0,6-0; *c* — Ц-I-0,3-15; *d* — Ц-II-0,3-15; *e* — Ц-I-0,3-30;
f — Ц-II-0,3-30; *g* — Ц-I-0,6-30; *h* — Ц-II-0,6-30; *i* — Ц-I-0,6-15

Fig. 4. Hysteresis diagrams for experimental columns:

a — Ц-0.3-0; *b* — Ц-0.6-0; *c* — Ц-I-0.3-15; *d* — Ц-II-0.3-15; *e* — Ц-I-0.3-30;
f — Ц-II-0.3-30; *g* — Ц-I-0.6-30; *h* — Ц-II-0.6-30; *i* — Ц-I-0.6-15

На основании полученных графиков были определены такие параметры, как прочность колонн в характерных точках деформирования, пластичность колонн, начальная и текущие жесткости колонн, диссипация энергии на циклах деформирования и гистерезисное демпфирование, а также сведения о высоте образовавшегося пластического шарнира. По имеющимся экспериментальным данным была разработана аналитическая методика расчета коррозионно-поврежденных колонн.

Численное моделирование. Для верификации результатов экспериментов и уточнении аналитического метода при интерполяции и экстраполяции полученных зависимостей был использован программный комплекс LS-DYNA с реализацией нелинейной модели бетона Continuous Surface Cap Model (CSCM). Арматурные стержни замоделированы балочными конечными элементами (BEAM), а бетон — объемными (SOLID). Изменение диаметра коррози-

онной арматуры моделировалось уменьшением размера КЭ, а учет сцепления выполнялся через функцию «Constrained_Lagrange_In_Solid» [9]. Режим нагружения, прочностные характеристики материалов и геометрия колонн в программном комплексе LS-DYNA соответствовали параметрам экспериментальных образцов (рис. 5).

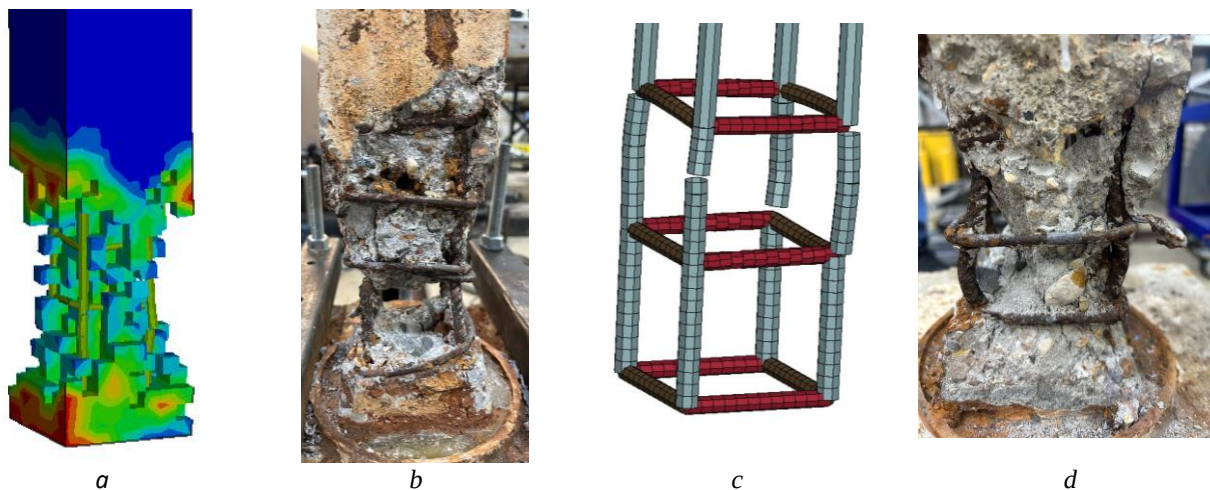


Рис. 5. Сравнение характера разрушения колонн:

a — расчет колонны в ПК LS-DYNA; *b* — разрушение колонны серии Ц-0,6-30; *c* — разрушение арматуры в ПК LS-DYNA; *d* — потеря устойчивости арматуры колонн серии Ц-0,3-30

Fig. 5. Comparison of the column failure patterns:

a — calculation using software LS-DYNA; *b* — failure of the column of series Ц-0.6-30; *c* — steel rebar fracture in numerical model by LS-DYNA; *d* — steel rebar buckling in the column of series Ц-0.3-30

Численное моделирование позволило уточнить зависимости (5–7) для учета параметров сцепления бетона с арматурой и подтвердило значительное влияние высоты пластического шарнира для определения расчетной высоты арматурного стержня при его потере устойчивости (14–15) в расчетах предельного пластического момента M_{pl} :

$$l_0 = l_{pl} \mu = \begin{cases} l_{pl} > S_w, & l = S_w, & \mu = 1 \\ l_{pl} \leq S_w, & l = l_p, & \mu = 0,7 \end{cases} \quad (14)$$

$$l_{pl} = \begin{cases} \text{неповрежденные колонны } (0,5-1)h; \\ \text{поврежденные колонны до 15\% } (1-1,5)h; \\ \text{поврежденные колонны до 30\% } (1,5-2)h. \end{cases} \quad (15)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам исследования были проведен сравнительный анализ полученной огибающей несущей способности при выполнении аналитического расчета, экспериментального исследования и численного моделирования (рис. 6).

По результатам сравнения предложенного аналитического метода расчета и экспериментальных данных погрешность аналитического расчета при определении момента в нормальном сечении составляет 5 %, а погрешность численной модели в ПК LS-DYNA при сопоставлении с экспериментальными данными по колоннам при определении горизонтальной реакции составляет 12 %. Сравнение результатов эксперимента с результатами численного и аналитиче-

ского расчета позволяет сделать вывод о корректности предложенного метода расчета коррозионно-поврежденных колонн при действии горизонтальных знакопеременных нагрузок, моделирующих сейсмическое воздействие.

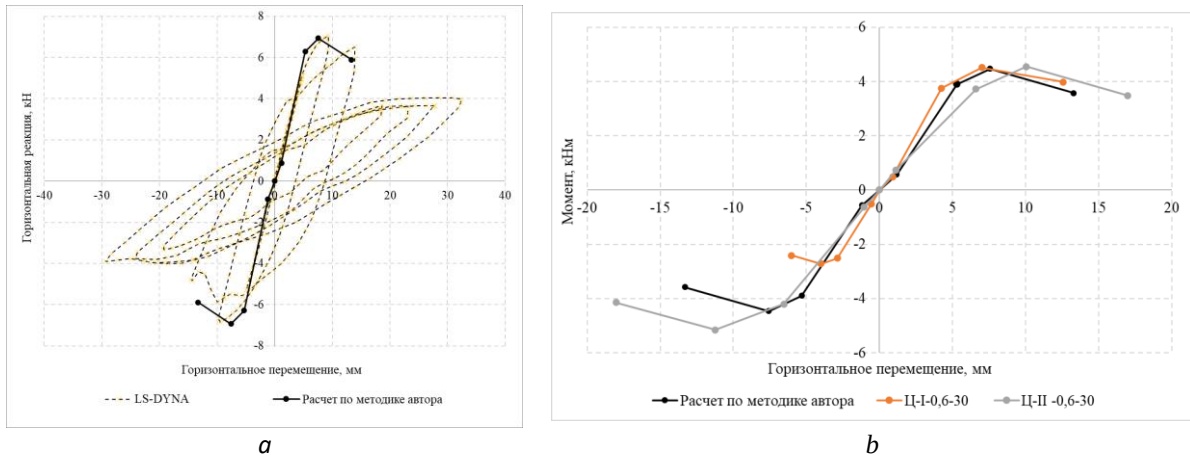


Рис. 6. Огибающие несущей способности:
 а — численный расчет; б — аналитический расчет
Fig. 6. Skeleton curve for bearing capacity:
 а — numerical modelling; б — analytical calculation

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных, теоретических и численных исследований по определению несущей способности железобетонных колонн, подверженных коррозии арматурных стержней, при действии знакопеременных горизонтальных воздействий, имитирующих сейсмические, можно сделать следующие выводы.

Коррозионные повреждения рабочей арматуры приводят к существенной деградации жесткости железобетонных колонн ввиду изменения геометрии поперечного сечения.

Выявлено снижение пластичности арматуры (до 68 %) и прочности (до 12 %), что повышает риск хрупкого разрушения при сейсмических воздействиях.

Предложенная расчетная модель огибающей гистерезиса включает три ключевых фактора коррозионного повреждения: снижение сцепления, риск выпучивания сжатых стержней и снижение эффективной прочности бетона в ядре сечения. Сравнение с экспериментом показало, что погрешность не превышает 5 % по усилиям и 18 % по перемещениям, что подтверждает пригодность метода для инженерных приложений.

Проведенная верификация аналитической методики с помощью экспериментальных данных и численного моделирования в ПК LS-DYNA подтвердила ее достоверность и применимость для практических расчетов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Соавтор статьи к.т.н. М.В. Кудрявцев выражает благодарность своему научному руководителю, д.т.н., профессору Ашоту Георгиевичу Тамразяну за ценные советы и указания, а также коллективу кафедры ЖБК НИУ МГСУ за оказанную поддержку и проведенные консультации. За профессиональную помощь и сотрудничество в проведении нестандартных, технически сложных испытаний выражаю благодарность директору НИИЭМ к.т.н. Александру Николаевичу Шувалову и коллективу лаборатории ЛИСМИиК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Влияние коррозионных повреждений арматуры на динамическое состояние сжатых железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2025. № 2 (118). С. 81–93.
2. Берлинов М.В., Берлинова М.Н., Творогов А.В., Печкина Е.К. Учет коррозионных повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций в условиях трехосного напряженно-деформированного состояния // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 3. С. 40–46.
3. Берлинова М.Н. К расчету сжатых железобетонных колонн в случае одностороннего химкоррозионного повреждения // Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 42–47.
4. Бондаренко В.М., Творогова М.Н., Исаева Е.М. Практический расчет силового сопротивления сжатых железобетонных стержней, поврежденных коррозией // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2006. № 10. С. 52.
5. Мацевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1462–1470.
6. Попов Д.С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 55–64.
7. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 46–54.
8. Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 6. С. 88–100.
9. Кудрявцев М.В. Численное моделирование коррозионно-поврежденных колонн при малоцикловом горизонтальном воздействии // Инженерный вестник Дона. 2025. № 6.
10. Прокопович А.А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном. Самара : НВФ «Сенсоры, Модули, Системы», 2000. 296 с.
11. Тамразян А.Г. Влияние перераспределения моментов на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов при повреждении напрягаемой арматуры вследствие коррозии // Железобетонные конструкции. 2025. № 12 (4). С. 5–17.
12. Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Предпосылки расчета гистерезиса железобетонных колонн при сейсмическом воздействии // Актуальные вопросы техники, науки, технологии : сб. науч. тр. нац. конф. (Брянск, 13–15 февр. 2025 г.) / под общ. ред. Т.Э. Сергутиной. Брянск : БГИТУ, 2025. С. 463–466.
13. ACI 374.2R-13. Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads. Farmington Hills (MI) : American Concrete Institute, 2013. 22 p.
14. Айзенберг Я.М., Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Смирнов В.И., Трекин Н.Н. Сейсмостойкие многоэтажные здания с железобетонным каркасом. М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2012. 264 с.
15. Жарницкий В.И., Алипур М.А. Сейсмостойкость железобетонных конструкций с учетом процесса развития повреждений // Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 110–115.
16. Кабанцев О.В., Умаров К.И. Особенности упругопластического деформирования рамносвязевых железобетонных каркасов при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 18–28.
17. Колчунов В.И., Кореньков П.А., Фан Д.Г. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 11. С. 1462–1472.
18. Мкртычев О.В. Нелинейные динамические методы расчета при проектировании объектов для сейсмических районов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 36–41.
19. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Оценка степени повреждения зданий при землетрясениях методом статистического моделирования // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 7. № 3. С. 3–11.
20. Хачиян Э.Е., Мелкумян М.Г. Методика получения динамической зависимости «восстанавливающая сила – перемещения» // Доклады Академии наук Армянской ССР. 1982. Т. 74. № 2. С. 72–77.
21. Tamrazyan A., Matseevich T. The criteria for assessing the safety of buildings with a reinforced concrete frame during an earthquake after a fire // Buildings. 2022. Т. 12. № 10. С. 1662.
22. Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Экспериментальное исследование поведения коррозионно-поврежденных колонн при знакопеременном малоцикловом нагружении // Системные технологии. 2025. № 1 (54). С. 5–15.
23. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Influence of Damage Level on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Structures when Assessing their Seismic Resistance // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. № 3.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Influence of corrosion damage of reinforcement on the dynamic state of compressed reinforced concrete structures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2025; 2(118):81-93. (In Russian).
2. Berlinov M.V., Berlinova M.N., Tvorogov A.V., Pechkina E.K. Accounting for corrosion damage of operated reinforced concrete structures under triaxial stress-strain state conditions. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020; 8(3):40-46. (In Russian).
3. Berlinova M.N. On the calculation of compressed reinforced concrete columns in the case of unilateral chemical corrosion damage. *Sistemnye tekhnologii*. 2023; 3(48):42-47. (In Russian).
4. Bondarenko V.M., Tvorogova M.N., Isaeva E.M. Practical calculation of the force resistance of compressed reinforced concrete rods damaged by corrosion. *Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk Rossiiskoi akademii arkitektury i stroitel'nykh nauk*. 2006; 10:52. (In Russian).
5. Matseevich T.A., Andreev I.F. Finite element model of chloride diffusion in prestressed corroded reinforcement of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU*. 2022; 17(11):1462-1470. (In Russian).
6. Popov D.S. Experimental studies of the dynamic properties of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2022; 2:55-64. (In Russian).
7. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Bearing capacity of reinforced concrete eccentrically compressed elements of building frames under corrosion damage under special actions. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2023; 1(1):46-54. (In Russian).
8. Smolyago G.A., Frolov N.V. Modern approaches to calculating the residual resource of bent reinforced concrete elements with corrosion damage. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019; 6:88-100. (In Russian).
9. Kudryavtsev M.V. Numerical modeling of corrosion-damaged columns under low-cycle horizontal loading. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2025; 6. (In Russian).
10. Prokopovich A.A. *Flexural resistance of reinforced concrete structures with various conditions of bond between longitudinal reinforcement and concrete*. Samara, NVF "Sensory, Moduli, Sistemy", 2000; 296. (In Russian).
11. Tamrazyan A.G. Influence of moment redistribution on the bearing capacity of bent reinforced concrete elements under damage of prestressed reinforcement due to corrosion. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2025; 12(4):5-17. (In Russian).
12. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Prerequisites for calculating the hysteresis of reinforced concrete columns under seismic action. *Issues of Engineering, Science, Technology : collection of scientific papers of the national conference (Bryansk, February 13–15, 2025)*. Ed. by T.E. Sergutina. Bryansk, BGITU, 2025; 463-466. (In Russian).
13. ACI 374.2R-13. Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads. Farmington Hills (MI), American Concrete Institute, 2013; 22.
14. Aizenberg Ya.M., Kodysh E.N., Nikitin I.K., Smirnov V.I., Trekin N.N. *Earthquake-resistant multi-storey buildings with reinforced concrete frame*. Moscow, Publishing House of the Association of Construction Universities, 2012; 264. (In Russian).
15. Zharnitsky V.I., Alipur M.A. Seismic resistance of reinforced concrete structures considering the process of damage development. *Vestnik MGSU*. 2011; 2-1:110-115. (In Russian).
16. Kabantsev O.V., Umarov K.I. Features of elastic-plastic deformation of frame-braced reinforced concrete frames under seismic action. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2020; 1:18-28. (In Russian).
17. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Fan D.G. Special limit state in reinforced concrete frames with joints reinforced by indirect reinforcement under accidental loads. *Vestnik MGSU*. 2021; 16(11):1462-1472. (In Russian).
18. Mkrtichev O.V. Nonlinear dynamic methods of calculation in the design of facilities for seismic regions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022; 9:36-41. (In Russian).
19. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Assessment of the damage degree of buildings during earthquakes by statistical modeling method. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2024; 7(3):3-11. (In Russian).
20. Khachiyan E.E., Melkumyan M.G. Methodology for obtaining the dynamic dependence "restoring force – displacement". *Doklady Akademii nauk Armyanskoi SSR*. 1982; 74(2):72-77. (In Russian).
21. Tamrazyan A., Matseevich T. The criteria for assessing the safety of buildings with a reinforced concrete frame during an earthquake after a fire. *Buildings*. 2022; 12(10):1662.
22. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Experimental study of the behavior of corrosion-damaged columns under alternating low-cycle loading. *Sistemnye tekhnologii*. 2025; 1(54):5-15. (In Russian).
23. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Influence of Damage Level on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Structures when Assessing their Seismic Resistance. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2024; 3.