

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, К.В. ЮРУСОВ¹

¹Национальный исследовательский московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ КОРРОЗИОННО ПОВРЕЖДЕННЫХ КОЛОНН ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ УДАРЕ

Аннотация. Вопросы живучести несущих конструкций при техногенных аварийных воздействиях в настоящее время приобретают все большую актуальность как в отечественной, так и в мировой строительной науке. В особенности это касается сжатых и сжато изгибающихся элементов, в том числе колонн зданий. Здания со значительным периодом эксплуатации накапливают коррозионные повреждения, которые приводят к местной деградации механических характеристик материалов, что может существенно сказаться на предельной несущей способности и живучести конструктивных систем в целом при динамических воздействиях. Разрабатывается подход к определению прочности нормальных сечений для внецентренно сжатых колонн в случае малого начального эксцентриситета при поперечном ударе. Коррозия рассматривается в виде «точечного» очага, в пределах которого могут быть деградированы механические характеристики как бетона, так и арматуры. Степень деградации механических характеристик материалов определяется по экспериментальным данным, получаемым на основе схем ускоренной коррозии. В зависимости от ее степени учитывается влияние стеснения деформаций бетона в направлении, перпендикулярном сжатию. Приводится верификационное сравнение разработанной методики с экспериментальными данными динамических испытаний колонн при поперечном ударе. Рассмотрен пример расчета коррозионно-поврежденной колонны.

Ключевые слова: поперечный удар, коррозионные повреждения, железобетонные конструкции, колонна, динамические воздействия, механическая безопасность.

A.V. ALEKSEYTSEV¹, K.V. YURUSOV¹

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

A PRACTICAL CALCULATION METHOD FOR THE NORMAL SECTION OF CORROSION-DAMAGED COLUMNS UNDER TRANSVERSE IMPACT

Abstract. The issues of the robustness of load-bearing structures under technogenic emergency impacts are currently becoming increasingly relevant in both domestic and global structural engineering. This is particularly true for compressed and compression-bent elements, including building columns. Buildings with a significant service life accumulate corrosion damage, which leads to local degradation of the mechanical properties of materials. This can substantially affect the ultimate load-bearing capacity and overall robustness of structural systems under dynamic loads. An approach is being developed to determine the strength of normal sections for eccentrically compressed columns with a small initial eccentricity under transverse impact. Corrosion is considered as a localized "spot" defect, within which the mechanical properties of both concrete and reinforcement may be degraded. The degree of degradation of the materials' mechanical properties is determined from experimental data obtained using accelerated corrosion schemes. Depending on the degree of corrosion, the effect of confinement on concrete deformations in the direction perpendicular to compression is taken into account. A verification comparison of the developed methodology with experimental data from dynamic tests of columns under transverse impact is provided. A calculation example for a corrosion-damaged column is considered.

Key words: transverse impact, corrosion damage, reinforced concrete structures, column, dynamic loads, structural safety

1. Введение

Задача обеспечения безопасности зданий и сооружений, подверженных коррозии, является актуальной в современных социально-экономических условиях. Значительная часть основных фондов капитального строительства имеет технический износ, часто включающий коррозионные повреждения балок и колонн. В связи с этим разрабатываются концепции и совершенствуются методики расчета таких железобетонных элементов [1-5]. При этом наиболее сложным и востребованным является описание комбинированных воздействий, например, сочетаний коррозии и пожара или коррозии и ударного воздействия [6, 7].

Одним из наиболее неизученных вопросов является комбинированное воздействие, включающее в себя механический поперечный удар по колонне в случае ее коррозионного повреждения. Процесс деформирования нагруженных колонн при поперечном ударе достаточно давно изучается как зарубежными, так и отечественными учеными [8-10]. Модели коррозионных повреждений как бетона, так и арматуры разрабатываются и совершенствуются во многих работах при этом используются различные схемы учета коррозии и удара, как правило на основе численного моделирования и экспериментально [11-17]. При этом уделяется внимание таким аспектам как начальные повреждения, трещиностойкость, потеря сцепления арматуры и бетона, возникающие динамические эффекты [18-25]. При описании этих процессов деформирования используются модели теории надежности, методы учета нелинейного поведения конструкций, случайный характер появления и распространения коррозии на основе вероятностных методов, а также неоднородные модели сцепления арматуры и бетона [26-30]. В большинстве исследований модели деформаций представляют собой объемные конечно-элементные схемы, нуждающиеся в очень тонкой настройке и исследовании параметров при уже известном результате. Поэтому возникает необходимость в упрощенном инженерном методе, позволяющем проводить вычислительно быструю оценку напряженно деформированного состояния конструкций как проектируемых с учетом прогноза по развитию коррозии, так и уже получивших коррозионные повреждения по результатам технического обследования. В такой модели упрощенно должна учитываться динамика конструкции и различные варианты коррозионных повреждений как бетона, так и арматуры.

2. Модели и методы

1. *Постановка задачи.* Рассматривается в общем случае внецентренно сжатая с малым эксцентризитетом колонна, имеющая коррозионные повреждения бетона и арматуры. Считается, что расположение и состояние очага коррозионных повреждений при действии поперечной аварийной ударной нагрузки не приводит к инициации разрушения колонны по наклонному сечению. Требуется определить максимальную интенсивность ударной нагрузки при действующем напряженно-деформированном состоянии колонны под эксплуатационными нагрузками. Границное неравенство предельных состояний первой группы для рассматриваемого нами случая можно записать в виде:

$$\Phi(F_v(t), F_h(t)) \leq \Phi(N(t), M(t))_{ult}, \quad (1)$$

где $\Phi()$, $\Phi()_{ult}$ – функции нагрузочного эффекта и предельной несущей способности колонны, $F_v(t)$, $F_h(t)$ – функции изменения во времени вертикальных и горизонтальных нагрузок, действующих на колонну; $N(t)$, $M(t)$ – функции изменения во времени внутренних усилий, которые может воспринять сечение.

В рамках инженерной методики расчета мы будем оперировать пиковыми значениями динамических нагрузок, которые могут быть определены на основе квазистатического подхода, когда статическое значение фактора, умножается на коэффициент динамики,

полученный ранее на основе развернутого динамического расчета. В этом случае уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{cases} k_{d1}N_{\max} \leq N_{cd,ult}, \\ k_{d2}M_{\max} \leq M_{cd,ult}, \end{cases} \quad (2)$$

где k_{d1} , k_{d2} – коэффициенты, определяемые произведением величин коэффициентов динамичности и динамического догружения; в случае, если при ударе в системе не разрушаются опорные связи, полагаем коэффициент динамического догружения равным единице, тогда $(k_{d1} \wedge k_{d2}) \leq 2$; N_{\max} , M_{\max} – максимальные внутренние усилия от статических эквивалентов нагрузки в колонне при действии эксплуатационной и пиковой ударной нагрузок, $N_{cd,ult}$, $M_{cd,ult}$ – предельные усилия, определяемые с учетом расчетных сопротивлений бетона и арматуры при их динамическом упрочнении, а также коррозионных повреждениях в случае расположения опасного сечения в очаге коррозии.

2. Упрощенный учет деградации материалов. Для определения жесткостей сечений коррозионно-поврежденных элементов запишем следующие зависимости:

$$\begin{aligned} I_{red}^{cor} &= I_b + I_s^{lb}, \quad I_s^{cor} = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_{s,i}^{cor} y_i^2, \quad \alpha_i = E_{si}^{cor} / E_b^{cor}, \\ E_b^{cor} &= \frac{\left(\sum_{j=1}^m E_{bj}^{cor} A_{bj} + E_{bd} A_b \right)}{bh_0} \rightarrow \\ I_{red}^{cor} &= I_b^{cor} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{si}^{cor}}{\sum_{j=1}^m E_{bj}^{cor} A_{bj} + E_{bd} A_b} bh_0 A_{s,i}^{cor} y_i^2 \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где I_{red}^{cor} приведенный к бетону главный момент инерции с учетом возможности коррозии m слоев бетона и n арматурных стержней, I_b – момент инерции неповрежденного бетона, E_{si}^{cor} – модуль упругости корродированной арматурной стали для стержня i , определяемый по методике [16], в частности по графику рис. 1, а; если коррозии стержня нет, то $E_{si}^{cor} = E_s$; E_{bj}^{cor} – модуль упругости слоя j корродированного бетона, определяемый в соответствии с моделью коррозии, в частности можно использовать модели, изложенные в [4, 13, 25]; b, h_0, y – соответственно ширина сечения, рабочая высота сечения, расстояние от оси, проходящей через центр тяжести стержня до оси центральной оси сечения, $A_{s,i}^{cor}$ – площадь арматурного стержня с учетом коррозионного износа, определяемая, например, по [14] или упрощенно: при износе в 10% – $A_{s,i}^{cor} = 0,9A_{s,i}$, в случае отсутствия коррозии $A_{s,i}^{cor} = A_s$; A_{bj}, A_b – площади частей сечения, поврежденные и неповрежденные коррозией, E_{bd} – модуль упругости неповрежденного бетона с учетом его деформаций от эксплуатационных нагрузок, $E_{bd} \approx 0,85E_b$.

Снижение под воздействием коррозии расчетных сопротивлений бетона R_b и стали R_s определяется на основе зависимостей

$$R_s^{cor} = k_{red}^s R_s, \quad R_b^{cor} = k_{red}^b R_b \quad (4)$$

где коэффициент редукции k_{red}^b зависит от степени стеснения поперечных деформаций или «ограниченности» бетона и может быть определен по графику (рис. 2, а-в); коэффициент редукции k_{red}^s определяется процентом износа арматурного сечения и может быть определен по графику (рис. 2, г). Графики коэффициентов редукции в формулах (4) получены на основе данных экспериментальных испытаний [17]. Под степенью C_b стеснения поперечных деформаций будем понимать отношение диаметра поперечной d_{sw} арматуры колонны к ее шагу S_w .

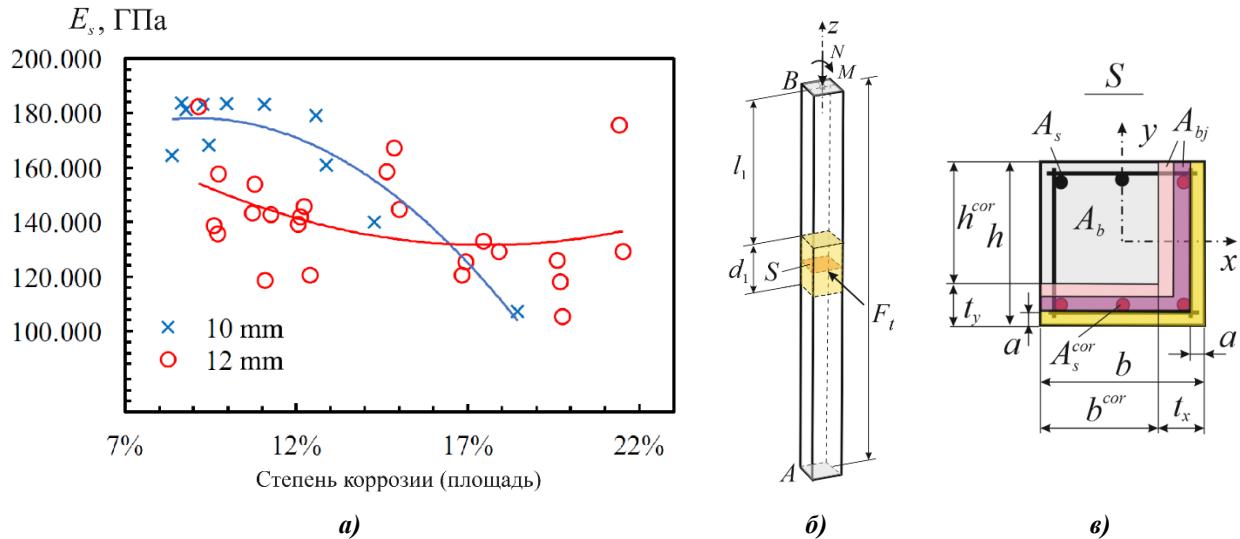
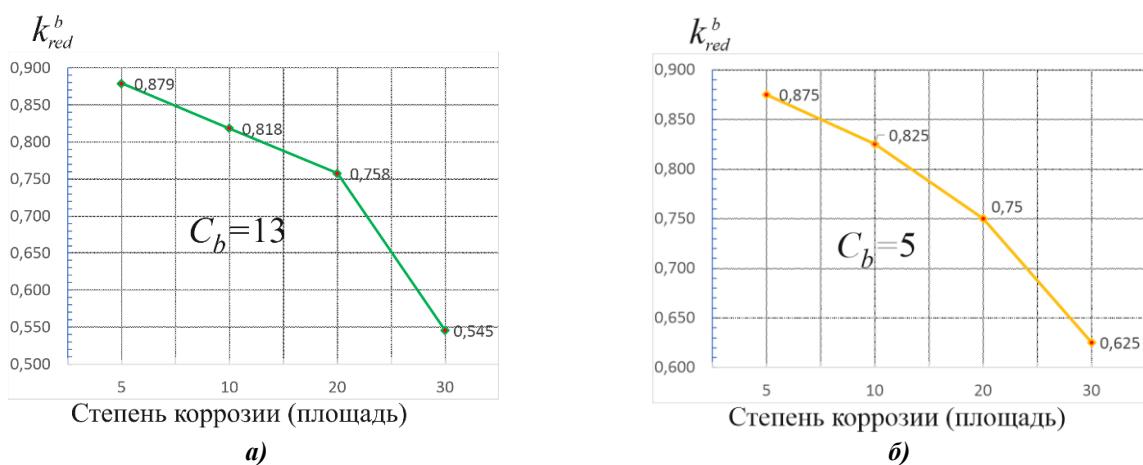


Рисунок 1 – К учету деградации материалов: общая расчетная схема с расположением очага коррозии: S – опасное сечение, A , B – сечения с кинематическими ограничениями, F_t – статический эквивалент механической ударной нагрузки (а); параметрическая схема коррозии бетона и арматуры (б); функция снижения модуля упругости арматуры в зависимости от степени коррозии (в)

2. Методика расчета. Суть методики расчета состоит в построении области прочности колонны в координатах «горизонтальная сила»–«продольное усилие» как показано на рис. 3. Эта область находится под кривой несущей способности, пересекающей оси координат.



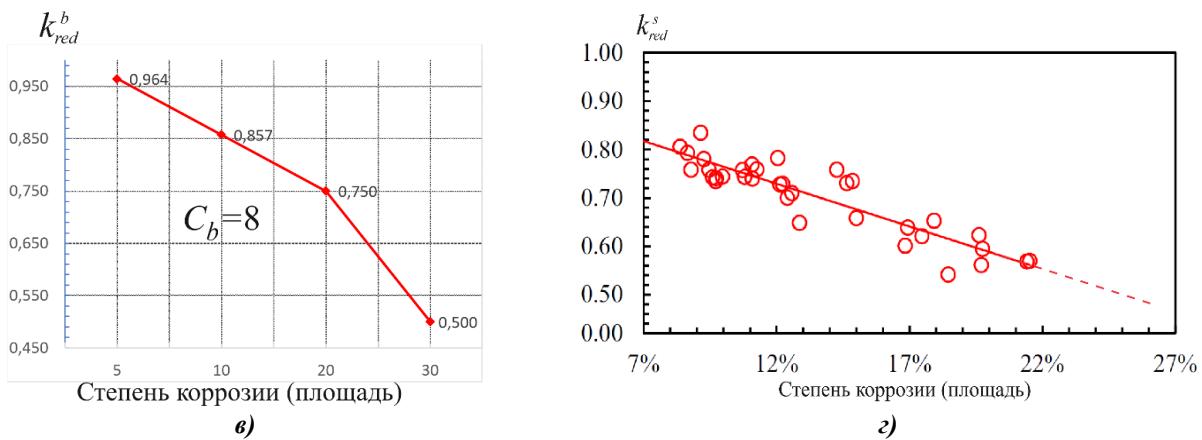


Рисунок 2 – Коэффициенты редукции при коррозии бетона и арматуры

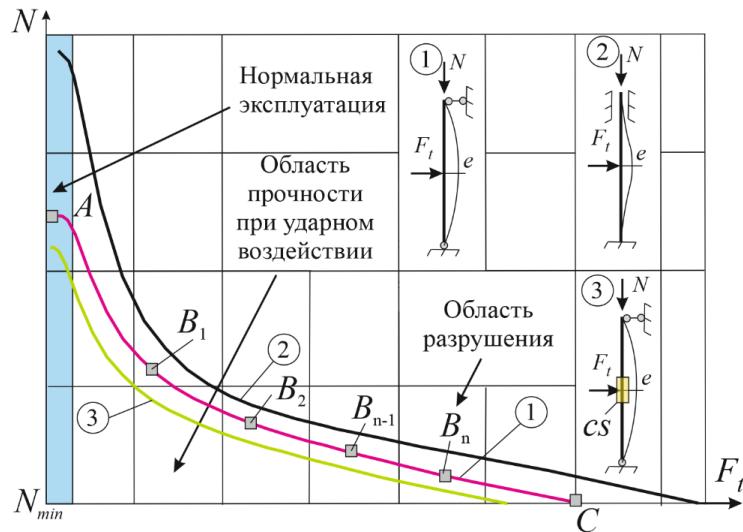


Рисунок 3 – Кривые несущей способности (общий вид) при различных условиях опирания и коррозионном повреждении

Построение кривой несущей способности сводится к нахождению точек A , B_i , C (см. рис. 3). Далее, для заданной эксплуатационной нагрузки следует лишь только проверить попадает ли значение горизонтальной силы в область прочности. Следует отметить, что построение области прочности следует выполнять всякий раз при изменении кинематических ограничений, эксплуатационных нагрузок и расположения горизонтальной аварийной нагрузки. Величина N_{min} на рис. 3 соответствует минимальной продольной силе в колонне, которая может наблюдаться, например, в период монтажа каркаса здания. Рассмотрим процесс построения кривой несущей способности.

Точка А. Здесь определяется максимальная продольная сила в зависимости от гибкости λ колонн. Предельное состояние характеризуется устойчивостью и прочностью по материалу с учетом продольного изгиба:

$$N_A(\lambda) = \begin{cases} \pi^2 E_b^{cor} I_{red}^{cor} / l_0^2, \lambda > 50; \\ \varphi \left[R_b^{cor} \sum_{j=1}^m A_{bj} + R_b A_b + R_s^{cor} \sum_{nc} A_s^{cor} + R_s A_s + R_{sc} A_{sc} \right], \lambda \leq 50, F_t = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где l_0 – расчетная длина колонны, R_{sc}, A_{sc}, R_s, A_s – расчётные сопротивления и площади арматуры при сжатии и растяжении соответственно, φ -коэффициент продольного изгиба (СП 63.13330), nc – число стержней, подверженных коррозии.

Точка С. Допускаем, что влияние минимальной продольной силы на изгиб незначительно. Возможно 2 случая: первый – сечение, в котором возникают максимальные усилия при действии горизонтальной нагрузки попадает в очаг коррозии, второй – не попадает. В соответствии с этим и с учетом (2) можно записать систему условий прочности:

$$\begin{cases} (k_{d2}M_{\max} \leq M_{d,ult}) \wedge (k_{d2}M_{sp} \leq M_{cd,ult}); \\ k_{d2}M_{\max} \leq M_{cd,ult} \end{cases}, \quad (6)$$

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент в сечении, находящемся вне коррозионных повреждений, $M_{d,ult}$ – предельный момент, воспринимаемый сечением без коррозионных повреждений с учетом динамического упрочнения материалов, $M_{cd,ult}$ – то же, но с коррозионными повреждениями, M_{sp} – момент в сечении, где есть коррозионные повреждения.

Предельный момент $M_{cd,ult}$ можно рассчитать из условия равновесия усилий в сечении относительно центра тяжести растягиваемой ударом арматуры в зависимости от расположения горизонтальной силы. Если воздействие приложено к неповрежденному бетону (рис. 4, а), то уравнение для момента принимает вид:

$$M_{cd,ult} = k_1 R_b \cdot b_{cor} \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R^{cor} + k_2 R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a), \quad (7)$$

в противном случае (рис. 4, б)

$$M_{cd,ult} = R_b^{cor} \cdot b_{cor} \cdot h_{0,cor}^2 \cdot \alpha_R^{cor} + R_{sc}^{cor} \cdot A_{sc}^{cor} \cdot (h_{0,cor} - a), \quad (8)$$

где k_1, k_2 коэффициенты динамического упрочнения материалов, $h_{0,cor} = 0,9h_0$ а величина

$$\alpha_R^{cor} = \xi_R^{cor} \cdot \left(1 - \frac{\xi_R^{cor}}{2}\right), \quad \xi_R^{cor} = \frac{0.9}{1 + R_s^{cor} / (E_s^{cor} \varepsilon_{b2})}. \quad (9)$$

Формула для ξ_R^{cor} приводится в [1], остальные величины показаны на рис. 4, б. Величина M_{\max} должна, кроме вклада горизонтальной силы, учитывать моменты в составе рамной системы и моменты от случайных эксцентрикитетов. В качестве примера для сечений 1, 2, 3 на рис. 4, в можно записать

$$M_{\max} = \max \{|M_1|, |M_2|, |M_3|\}; \quad M_1 = M_f + M(F_t) + Me; \quad M_2 = M_f - M(F_t) + Me; \quad M_3 = -M_f + M(F_t) + Me. \quad (10)$$

Формулы для изгибающих моментов от горизонтальной нагрузки можно найти по таблицам эпюров или непосредственным расчетом в зависимости от конкретных закреплений колонны. Далее, подставляя (7)-(9) в (6), определяется значение F_t .

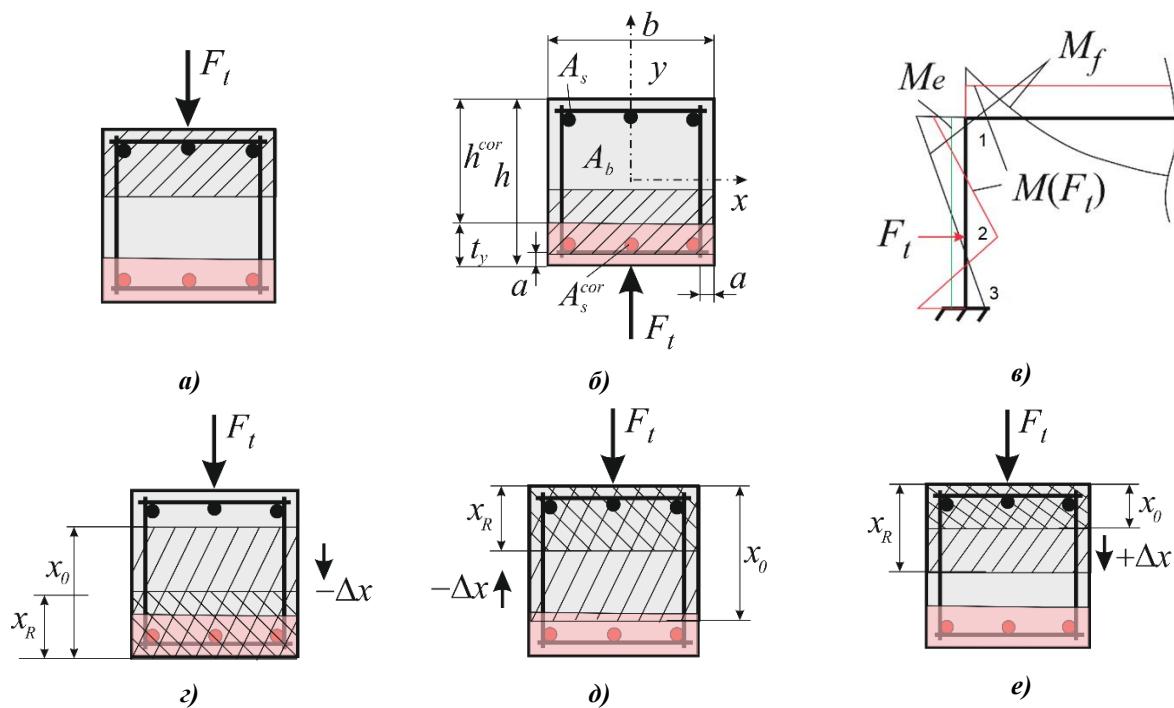


Рисунок 4 – К вычислению максимальной горизонтальной силы: расположение ударного воздействия (а), (б); схема рамы для примера определения величины M_{\max} (в), случаи перераспределения напряжений сжатия с ростом или уменьшением сжатой зоны бетона (г)-(е)

Точки $B_1 - B_n$. Очевидно, что данная область будет содержать значения горизонтальной силы, которые инициируют переход от пластического разрушения к хрупкому. При этом первоначально при наличии коррозии арматуры по формуле (9) вычисляется граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона. Для каждой точки B_i задается значение продольной силы N_i из интервала $(N_A; N_{\min})$ на рис. 3. Число n здесь определяет точность последующего прогноза по величине горизонтальной силы. Далее в цикле по числу точек B_i решается уравнение равновесия с учетом наличия продольной силы из которого находится значение горизонтальной силы. Для его решения выполняем ряд этапов:

1. Вычисляется высота сжатой зоны бетона и ее относительная величина.

$$x^{cor} = x_m + \frac{I_{red}^{cor} N}{A_{red}^{cor} M}, \quad x_m = \sqrt{\alpha_s^2 (\mu_s + \mu'_s)^2 + 2\alpha_s (\mu_s + \mu'_s a' / h_0^{cor})} - \alpha_s (\mu_s + \mu'_s). \quad (11)$$

$$\alpha_s = \frac{0,0015 E_s^{cor}}{R_{b,ser}}, \quad \mu_s = \frac{A_s}{bh_0}, \quad \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}, \quad M = M_f + M_e. \quad A_{red}^{cor} = bh - A_{b1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{si}}{E_{bd}} A_{s,i};$$

В формулах (11) в случае дальнейших вычислений по формуле (13) принимается $h_0 = h_0^{cor}$, $A'_s = A_s^{cor}$, для условия (14) – $A_s = A_s^{cor}$.

Проверяется условие $\xi_R^{cor} \leq \xi_0^{cor} = x^{cor} / h_0^{cor}$, если оно удовлетворено, то в расчетах для следующих значений N_i продолжает использоваться формула (11), если $\xi_R^{cor} > \xi_0^{cor}$, то для x_m используется выражение

$$x_m^{cor} = \frac{N}{\varphi R_b^{cor} b_{cor}} , \quad x_m^{cor} \leq h_0^{cor} . \quad (12)$$

Уравнение равновесия внешних и внутренних сил в случае сжатия поврежденной части имеет вид:

$$M_{max} + Ne_f \leq [R_b^{cor} b_{cor} x_1^{cor} (h_0^{cor} - 0,5x_1^{cor}) + R_{sc}^{cor} A_{sc}^{cor} (h_0^{cor} - a)] , \quad x_1^{cor} = x_R^{cor} - x^{cor} , \quad (13)$$

в противном случае

$$M_{max} + Ne_f = k_1 R_b \cdot b_{cor} \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R^{cor} + k_2 R_{sc} \cdot A_s' \cdot (h_0 - a) . \quad (14)$$

Здесь значение эксцентрикитета продольной силы определяем так:

$$e_f = \frac{1}{1 - N/N_A |_{\lambda > 50}} \left(f + \frac{h_{0,cor} - a}{2} \right) . \quad (15)$$

Учет величины x^{cor} осуществляется по рис 4. В случае отрицательного приращения (разгрузки сечения) в запас прочности можно принимать $x^{cor} = 0$, тогда $x_1^{cor} = x_R^{cor}$, в случае дагружения сечения (рис. 4, е) $x^{cor} \neq 0$, это случай больших эксцентрикитетов, не рассматриваемый в данной статье.

Прогиб f от действия горизонтальной силы можно определить через кривизну, зная жесткость в сечении элемента. Эту жесткость с учетом коррозии можно определить как

$$D_{corr} = E_{red} I_{red}^{cor}, \quad E_{red} = \frac{R_{b,ser} / \varepsilon_{b1,red} x^{cor} b_{cor} + E_s^{cor} A_s^{cor} + E_s A_s}{x^{cor} b_{cor} + A_s^{cor} + A_s} . \quad (16)$$

Тогда прогиб колонны при разбиении ее на n участков одинаковой длины Δl :

$$f = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta l} \bar{M}_i \left(\frac{1}{r} \right)_i dz = \sum_{i1=1}^{n1} \int_0^{\Delta l_{i1}} \bar{M}_{i1} \left(\frac{M}{D} \right)_{i1} dz + \sum_{i2=1}^{n2} \int_0^{\Delta l_{i2}} \bar{M}_{i2} \left(\frac{M}{D_{corr}} \right)_{i2} dz . \quad (17)$$

где D – жесткость элемента без коррозионных повреждений, $n1$ число участков без коррозионных повреждений, $n2$ – число участков, определяющих длину очага коррозии d_1 (рис. 1, б).

Для перехода от динамической нагрузки с заданной формой импульса, например, показанной на рис. 5., к значению механической силы можно использовать формулу

$$P = \Omega F_t / \Delta t , \quad (18)$$

где ΩF_t – площадь фигуры импульса, Δt – время динамического воздействия.

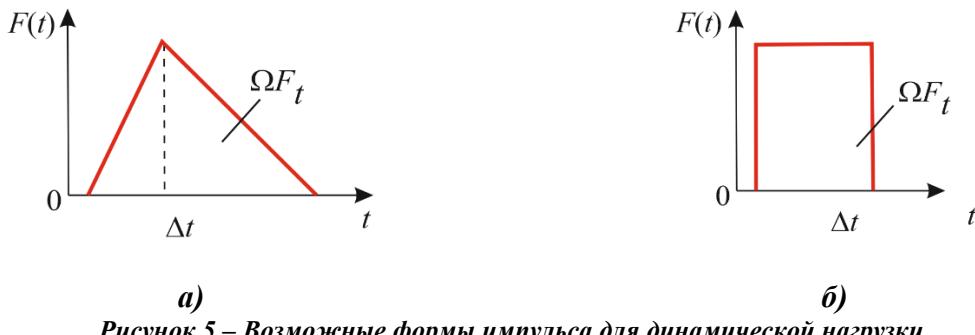


Рисунок 5 – Возможные формы импульса для динамической нагрузки

3. Результаты исследования и их анализ

Для верификации предложенного метода используем экспериментальные данные динамических испытаний из работы [10], где сжатый железобетонный образец подвергался динамической нагрузке. Коррозионных воздействий не было поэтому в проверочном расчете деградацию механических характеристик бетона и арматуры не учитываем. Расчетная схема образца приведена на рис. 6, а. Имеются данные о геометрии и сопротивлениях по двум испытаниям одинаковых образцов, приведенные в таблице 1. Армирование рабочей арматурой выполнено из 4 стержней диаметра 18 мм, периодического профиля расположенных симметрично в углах прямоугольного сечения.

Запишем уравнение равновесия (14) применительно к данной экспериментальной задаче $M_{\max} + Ne_f = k_1 R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R + k_2 R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a')$. По результатам экспериментальных испытаний, приводимых различными авторами, в т.ч. принимая во внимание работу [2] можно назначить $k_1 = 1,15$, $k_2 = 1,2$, вычислим с учетом отсутствия коррозии по (9) величины $\xi_R = 0,8 / (1 + (442 / 2 \cdot 10^5) / 0,0035) = 0,49$, $\alpha_R = 0,49(1 - 0,49 / 2) = 0,37$.

Таблица 1 – Экспериментальные данные динамических испытаний [10]

Марка	$h \times b$	h_0	$h_0 - a'$	R_b	$A_s = A_{sc}$	R_s	$N_{\text{эксп}}$	$P_{\text{эксп}}$
	см				МПа		кН	
K-18-Д3	23,7x15,5	22	19	29,8	5,09	442	480	420
18-Д3	23,5x15,5	20,5	18				480	394



Рисунок 6 – К верификации методики расчета: расчетная схема в эксперименте (а), результат испытания (б)

Изгибающий момент составит $F_t l / 6 = 0,23 F_t$ (Н). Полный эксцентриситет определяем по (15). Для этого определим приведенные к бетону характеристики сечения $I_{red} = 23,6^3 \cdot 15,5 / 12 + 6,66 \cdot 2 \cdot 5,09 \cdot (18,5 / 2)^2 = 22779$ см⁴. $N_A = \pi^2 3 \cdot 10^7 \cdot 22779 \cdot 10^{-8} / 1,38^2 = 35379$ кН. Прогиб от действия динамической силы $f = F_t l^3 / 48 E_{red} I_{red} = F_t \cdot 1,38^3 / 48 \cdot 26333 \times 22779 \cdot 10^{-2} = F_t \cdot 9,1624 \cdot 10^{-7}$ см. $e_f = 1 / (1 - 480 / 35379) \left(F_t \cdot 9,1624 \cdot 10^{-7} + 18,5 / 2 \right) = 9,376 + 0,9288 F_t \cdot 10^{-6}$ см. Подставляя все значения в уравнение (14), имеем $23,445 F_t$ (кН) = $10946 + 7468$, $F_t = 670,24$, $P = F_t / 1,5 = 670,24 / 1,5 = 446,6$ кН.

Здесь, для перехода к статическому эквиваленту и сравнения с экспериментальным значением в таблице 1 был использован коэффициент $k_{d2} = 1,5$ (см. (2)). Результат удовлетворительно (с отклонением около 10%) соответствует среднему экспериментальному значению 407 кН. Снижение нагрузки связано с неопределенностью коэффициента динамики в данном примере. При уточнении условий, связанных с начальной скоростью удара и фактическими для данного бетона и арматуры коэффициентами динамического упрочнения, соответствие может быть еще лучше.

Пример расчета колонны с коррозионными повреждениями. Рассмотрим железобетонную колонну высотой 4,5 м, сечением 400x400 мм, расстояние $a=5$ см (рис. 7 а, б). Колонна симметрично армируется стержнями продольной арматуры 4d28 A500C, $A_{sc}^{\phi 28} = 6,158 \text{ см}^2$, $R_{sc} = 435 \text{ МПа}$. Поперечная арматура d12 A240 расположена в приопорных участках с шагом 100 мм, далее с шагом 300 мм. Колонна изготовлена из бетона В20, $R_b = 11,5 \text{ МПа}$, $E_b = 27500 \text{ МПа}$.

В результате оценки технического состояния установлено, что степень коррозии арматуры 20%, коррозии подвержены три стержня $A_{sc}^{cor, \phi 28} = 4,9264 \text{ см}^2$. По графику рис. 2, а $R_s^{cor} = 0,6 \cdot 435 = 261 \text{ МПа}$. Бетон подвергся коррозии с двух сторон колонны, $t_x = 5 \text{ см}$, $t_y = 10 \text{ см}$. Среднее снижение модуля упругости на этом участке составило 40%, то есть $E_s^{cor} = 11000 \text{ МПа}$. С учетом графика рис. 1, в принимаем $E_s^{cor} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Значения усилий из статического расчета следующие $N = 900 \text{ кН}$, $M_{f1} = 27 \text{ кНм}$, $M_{f2} = 12 \text{ кНм}$, момент от случайного эксцентричеситета в 1 см равен $M_e = 9 \text{ кНм}$. Размер очага коррозии $d_l = 0,5 \text{ м}$.

Требуется определить значение горизонтальной внезапно приложенной ударной нагрузки, действующей на конструкцию в течение 1 с. Форма импульса прямоугольная.

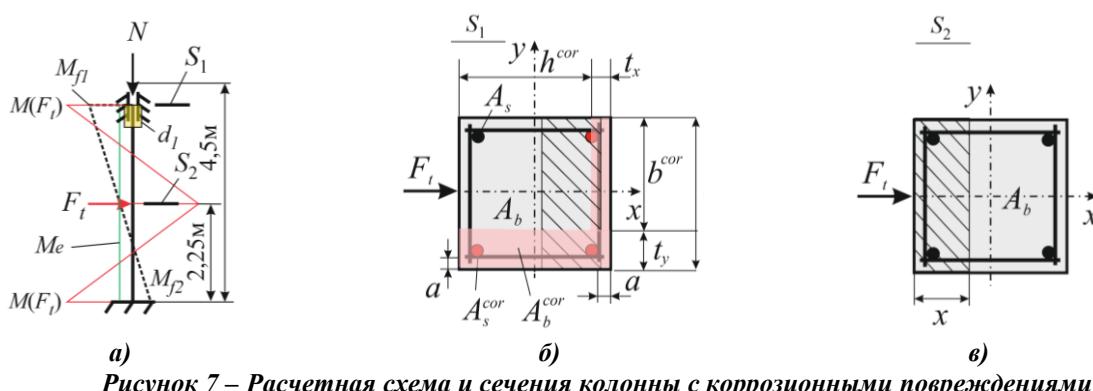


Рисунок 7 – Расчетная схема и сечения колонны с коррозионными повреждениями

Определяем расчетные значения моментов для сечений S_1 , S_2 : $M_1 = 27+9=36 \text{ кНм}$, $M_2 = (27-12)/2+9=14,5 \text{ кНм}$. Вычисляем уровень стеснения поперечных деформаций на приопорных участках $C_b = 100/12 = 8,3$, используем рисунок 2, в, вычисляя $R_b^{cor} = 0,75R_b = 8,625 \text{ МПа}$. Находим приведенный момент инерции с учетом коррозии трех стержней арматуры ($n = 3$) и поврежденной площади бетона, для упрощения расчетов в данном примере в пределах этой площади разбивку на слои не выполняем, тогда $m = 1$. При этом $E_{bd} = 0,85 \cdot 27500 = 23375 \text{ МПа}$, $A_{b1} = t_y h + t_x b = 40(10+5) = 600 \text{ см}^2$,

$$A_b = 1600 - 600 = 1000 \text{ см}^2.$$

$$I_{red}^{cor} = \frac{35^3 \cdot 30}{12} + \frac{2 \cdot 10^5}{27500} 6,158(40/2-5)^2 + 3 \left(\frac{1,4 \cdot 10^5}{11000 \cdot 600 + 23375 \cdot 1000} 40 \cdot 35 \cdot 4,9264 \cdot (40/2-5)^2 \right) = \\ = 136263 \text{ см}^4.$$

$$\alpha_s = \frac{0,0015 \cdot 1,4 \cdot 10^5}{15} = 14, \mu_s = \frac{6,158 \cdot 2}{40 \cdot 35} = 0,00879, \mu'_s = \frac{6,158 + 4,9264}{40 \cdot 35} = 0,00791$$

$$x_m = \sqrt{14^2(0,00879 + 0,00791)^2 + 2 \cdot 14(0,00879 + 0,00791 \cdot 5/35) - 14(0,00879 + 0,00791)} = 1,651 \text{ см.}$$

$$A_{red}^{cor} = 1600 - 600 + \frac{(2 \cdot 6,158 + 1,4 \cdot 3 \cdot 4,9264) \cdot 10^5}{23375} = 1141,2 \text{ см}^2; \text{ До ударного воздействия}$$

$$x^{cor} = 1,651 + \frac{136263 \cdot 900}{1141,2 \cdot 4600} = 23,36 \text{ см. } \xi_0^{cor} = 0,6674 > \xi_R^{cor} = \frac{0,9}{1+261/(1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,0035)} = 0,587.$$

Большая часть сечения сжата, при ударе происходит уменьшение сжатой зоны (разгрузка части сечения) вплоть до величины $x_R^{cor} = 0,587 \cdot h^{cor} = 20,545$, тогда в уравнении (13) учитываем только величину $x^{cor} = 20,545$ см. Для использования уравнения (13) необходимо определить статический прогиб коррозионно-поврежденной колонны. Для этого можно использовать формулы (16), (17) или методику статьи [31]. Вычисляем предварительно жесткость неповрежденного и поврежденного сжатого сечения:

$$\begin{aligned} D &= \frac{0,15 E_b I}{\varphi_l(0,3 + \delta_e)} + 0,7 E_s I_s = \frac{0,15 \cdot 27500000 \cdot 213,3 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot (0,3 + 0,15)} + 0,7 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0,15^2 \cdot 6,158 \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,381 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м}^2, D_{corr} = E_{red} I_{red}, E_{red} = \frac{R_{b,ser} / \varepsilon_{b1,red} \Delta x^{cor} b_{cor} + E_s^{cor} A_s^{cor} + E_s A_s}{\Delta x^{cor} b_{cor} + A_s^{cor} + A_s} = \\ &= \frac{15 / 0,0015 \cdot 14,355 \cdot 30 + 1,4 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 4,9264 + 2,0 \cdot 10^5 \cdot 6,158}{14,355 \cdot 30 + 3 \cdot 4,9264 + 6,158} = 0,168 \cdot 10^8 \text{ кН} / \text{м}^2, \end{aligned}$$

$$D_{corr} = 0,168 \cdot 10^8 \cdot 136263 \cdot 10^{-8} = 0,2289 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Пользуясь формулой Симпсона и формой эпюры $M(F_t)$ (рис. 7, а), формулу (17) можно привести к виду (см):

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{D} \left[\frac{225}{6} \left(2 \cdot F_t \cdot 56,25^2 \right) + \frac{200}{6} \left(2 \cdot F_t \cdot 56,25^2 + 2 \cdot F_t \cdot \left(\frac{2}{2,5} \cdot 56,25 \right)^2 - 2 \cdot F_t \cdot \frac{2}{2,5} \cdot 56,25^2 \right) \right] + \\ &+ \frac{1}{D_{corr}} \left[\frac{50}{6} \left(2 \cdot F_t \cdot 56,25^2 + 2 \cdot F_t \cdot \left(\frac{2}{2,5} \cdot 56,25 \right)^2 + 2 \cdot F_t \cdot \frac{2}{2,5} \cdot 56,25^2 \right) \right] = (0,0235 + 0,0812) \cdot F_t = \\ &= 0,01047 \cdot F_t \end{aligned}$$

Вычисляем критическую силу $N_A = \pi^2 0,2289 \cdot 10^5 / (0,5 \cdot 4,5)^2 = 44579$ кН, эксцентризитет

$$e_{fs2} = 1 / (1 - 900 / 44579) (0,01047 F_t + (35 - 5) / 2) = 001086 F_t + 15,3 \text{ см,}$$

$e_{fs1} = ((35 - 5) / 2) = 15$ см. Находим значение F_t из условия прочности сечения S_1 . Подставляем значения в уравнение (13), выражая значения в кН и см, при этом поскольку удар передается по неповрежденной части учитываем динамическое упрочнение материалов в правой части коэффициенты упрочнения принимаем такими же как в верификационной задаче:

$$3600 + F_t \cdot 450 / 8 + 900 \cdot 15 \leq \left[\begin{array}{l} 1,15 \cdot 0,8625 \cdot 25 \cdot 20,545 (35 - 0,5 \cdot 20,545) + \\ 1,2 \cdot 26,1 \cdot (4,9264 + 6,158) (35 - 5) \end{array} \right].$$

Отсюда $56,25 F_t \leq 12597 + 10414 - 3600 - 13500 \rightarrow F_t = 105,1$ кН. Для прямоугольной формы импульса значение статического эквивалента нагрузки с учетом произведения коэффициентов динамичности и динамического догружения, которое равно 1,5, составит $F_{td} = 105,1 / (1,5 \cdot 1) = 70$ кН.

При такой нагрузке напряженное состояние сечения S_2 , будет вызвано моментом:

$M = 1450 + 105,1 \cdot 450 / 8 + 900 \cdot (105,1 \cdot 0,01047 + 15,3) = 22522 \text{ кН} \cdot \text{см}$, предельный момент в этом сечении при отсутствии коррозии по формуле (8), определим обычным способом:

$$\alpha_R = \xi_R \left(1 - \frac{\xi_R}{2} \right) = 0,493 \left(1 - \frac{0,493}{2} \right) = 0,3714:$$

$$M_{S2,ult} = R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R + R_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (h_0 - a'_s) = 1,15 \cdot 1,15 \cdot 40 \cdot 35^2 \cdot 0,3714 + 1,2 \cdot 43,5 \cdot 6,128 \cdot 2(35 - 5) = 24067 + 19928 = 43995 \text{ кН} \cdot \text{см} > M, \text{ прочность сечения обеспечена. Для сечения } S_1 \\ M_{S1,ult} = 12597 + 10414 = 23011 \text{ кН} \cdot \text{см} = M + N_{fs1} = 5911 + 13500 + 3600 = 23011 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

Прочность обеспечена. Результаты расчета показаны на рисунке 8. Значение продольных сил округлялось до целого.

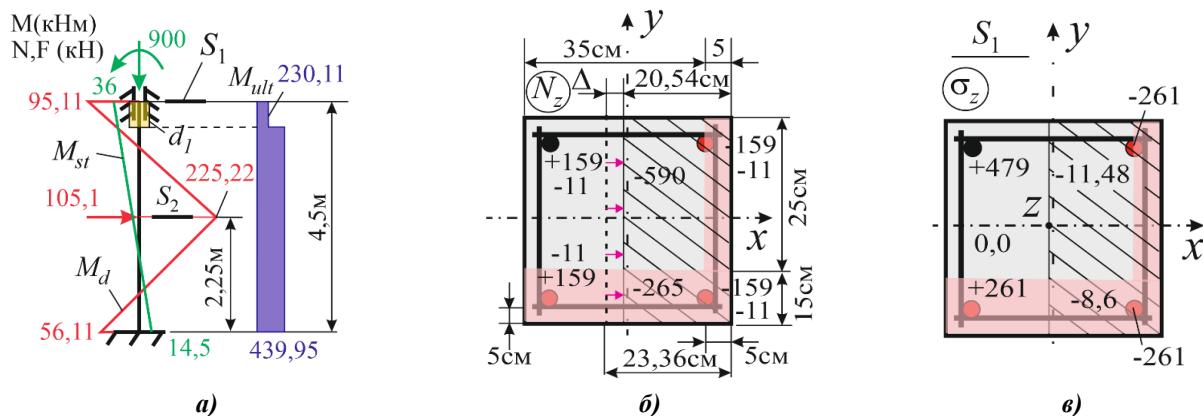


Рисунок 8 – Напряженное состояние сечений колонны в момент предразрушения: расчетная схема (а); M_{st}, M_d, M_{ult} – эпюры изгибающих моментов от статической, динамической нагрузок и предельного момента воспринимаемого сечением; продольные силы (кН), воспринимаемые элементами сечения (б); нормальные напряжения (МПа) после перераспределения усилий в предельном состоянии

Как видно из рисунка 8, а предельное состояние возникает именно в заделке с коррозионным повреждением, на схеме рис. 8, б значение усилий, приходящихся на стержни от действия воспринимаемой продольной силы (11 кН), и изгибающего момента (95,11/0,3)/2 ≈ 159 кН. С учетом нелинейной работы стали и ее размягчения при действии коррозии происходит перераспределение усилий и напряжений в стержнях. Каждый коррозионно-поврежденный стержень может воспринять $26,1 \cdot 4,9264 \approx 128$ кН, тогда неповрежденный стержень воспримет оставшуюся продольную силу. Как видно из рис. 8, в, этот стержень деформируется в зоне упрочнения, т.к. напряжения 479 МПа незначительно превышают предел текучести 432 МПа. Уровень пластических деформаций в корродированных стержнях составит при билинейной диаграмме деформирования $10((159+11)-128)/(4,9264)20000=0,0042$, что в совокупности с упругими деформациями не превышает предельных деформаций разрыва стали.

Следует отметить, что в настоящей статье в качестве примера рассмотрен один из частных случаев. В общем случае методика расчета по нормальному сечению распадается на четыре варианта. Первые два, когда сила располагается в очаге коррозии, при этом возможен удар как по деградированвшей, так и по неповрежденной части, третий и четвертый варианты, когда сила вне очага коррозии, а момент, ею вызванный, вызывает сжатие пораженной зоны либо неповрежденной зоны. Кроме того, в результате исходного статического нагружения может оказаться так, что ударная сила вызывает переходный процесс от сжатия к растяжению бетона и наоборот, как показано на рис. 4.

Все это требует правильного учета констант и корректировки уравнений. Первый опыт

расчета показал, что методика дает несколько заниженные по сравнению с численным моделированием значения. Но следует также иметь в виду, что численные модели по сравнению с предложенной методикой в зависимости от модели бетона, учета сцепления, упрочнения, образования трещин и прочих факторов дают очень большой разброс в результатах, что заставляет усомниться в корректности такого инструмента для верификации этой задачи. Конечно, методика нуждается для дополнительной верификации и возможного уточнения в обширных экспериментальных исследованиях по получению коэффициентов динамичности, динамического догружения и закономерностях в деградации механических характеристик материалов. Требует также разработки и метод расчета по наклонным сечениям. Экспериментальные исследования с тестированием корродированных конструкций еще впереди.

4. Заключение

1. Разработан метод аналитического расчета по нормальным сечениям коррозионно-поврежденных сжато-изогнутых железобетонных элементов на поперечный удар. Он позволяет учитывать различные конфигурации и объемы коррозионных повреждений, дислокацию и размер очага коррозии, дискретность расположения рабочей арматуры и ее коррозионные повреждения для каждого из стержней, а также стеснение поперечных деформаций бетона, ограниченного связными контурами поперечной арматуры.

2. Предложенные зависимости можно взять за основу при нормировании проверочных расчетов обследуемых конструкций, а также для учета повреждений в жизненном цикле зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrazyan, A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading. Buildings 2023, 13, 2133. <https://doi.org/10.3390/buildings13092133>
2. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределеных физически и конструктивно нелинейных системах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42-51. doi: 10.33622/0869-7019.
3. Тамразян А.Г. Усталостное поведение изгибаемых железобетонных балок при коррозии. Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 22-34
4. Бондаренко В.М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 13-17.
5. Кудрявцев М.В., Тамразян А.Г. Методика определения несущей способности коррозионно-поврежденных колонн при сейсмических воздействиях. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Т. 24. № 1. С. 20-27.
6. Тамразян А.Г. Несущая способность коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, подвергнутых огневому воздействию Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 4. С. 130-137.
7. Sun, J.-M., Yi, W.-J., Chen, H., Peng, F., Zhou, Y., Zhang, W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. Journal of Structural Engineering. 2023. 149(1). DOI:10.1061/j.sendh/steng-11612.
8. Zhang, W.-P., Chen, J.-P., Yu, Q.-Q., Gu, X.-L. Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling. STRUCTURAL SAFETY. 2021. 88. DOI:10.1016/j.strusafe.2020.102037.
9. Zhao, W., Qian, J. Resistance mechanism and reliability analysis of reinforced concrete columns subjected to lateral impact. International Journal of Impact Engineering. 2020. 136. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.103413.
10. Пузанков Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский ордена труда красного знамени инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. Москва, 1979
11. Daneshvar, K., Moradi, M.J., Ahmadi, K., Hajiloo, H. Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2021. 284. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.
12. He, S., Cao, Z., Ma, J., Zeng, S., Li, P., Wang, H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams. ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING. 2021. 2021. DOI:10.1155/2021/6693224.

13. Бондаренко В.М. Особенности силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных элементов знакопеременному нагружению. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 1. С. А30-38.
14. Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1 (70). С. 43-49.
15. Yu, X.-H., Dai, K.-Y., Li, Y.-S. Variability in corrosion damage models and its effect on seismic collapse fragility of aging reinforced concrete frames. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2021. 295. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123654.
16. Fernandez, I., Bairán, J.M., Marí, A.R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - e behavior. Construction and Building Materials. 2015. 101. Pp. 772–783. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.139.
17. Aminulai, H.O., Robinson, A.F., Ferguson, N.S., Kashani, M.M. Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading. Engineering Structures. 2023. 289. Pp. 116245. DOI:10.1016/J.ENGSSTRUCT.2023.116245.
18. Алексеев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием. Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23-34.
19. Klueva, N., Emelyanov, S., Kolchunov, V., Gubanova, M. Criterion of Crack Resistance of Corrosion Damaged Concrete in Plane Stress State. Procedia Engineering. 2015. 117(1). Pp. 179–185. DOI:10.1016/J.PROENG.2015.08.144.
20. Nasser, H., Van Steen, C., Vandewalle, L., Verstrynghe, E. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2021. 286. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.
21. Алексеев А.В., Юрасов К.В. Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки. Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 667-682.
22. Yu, X., Robuschi, S., Fernandez, I., Lundgren, K. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112309.
23. Chen, S., Duffield, C., Miramini, S., Raja, B.N.K., Zhang, L. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112143.
24. Luo, Y., Zheng, H., Zhang, H., Liu, Y. Fatigue reliability evaluation of aging prestressed concrete bridge accounting for stochastic traffic loading and resistance degradation. ADVANCES IN STRUCTURAL ENGINEERING. DOI:10.1177/13694332211017995.
25. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внерадиально сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий. Железобетонные конструкции. 2023;1(1):46-54.
26. Bojorquez, J., Ponce, S., Ruiz, S.E., Bojorquez, E., Reyes-Salazar, A., Barraza, M., Chavez, R., Valenzuela, F., Leyva, H., Baca, V. Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112161.
27. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексеев 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.
28. Zhao, W., Ye, J. Dynamic behavior and damage assessment of RC columns subjected to lateral soft impact. Engineering Structures. 2022. 251. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113476.
29. Daneshvar, K., Moradi, M.J., Ahmadi, K., Mahdavi, G., Hariri-Ardebili, M.A. Dynamic behavior of corroded RC slabs with macro-level stochastic finite element simulations. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112056.
30. Fu, C., Fang, D., Ye, H., Huang, L., Wang, J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 226. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111392.
31. Курченко Н.С., Гришков В.А. К оценке жесткости коррозионно-повреждаемых железобетонных балок. Инженерный вестник Дона. 2022. № 9 (93). С. 112-123.

REFERENCES

1. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading. Buildings. 2023;13:2133. <https://doi.org/10.3390/buildings13092133>
2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu. Dinamicheskiye effekty v staticheskikh neopredelimykh fizicheskikh i konstruktivno nelineynykh tekhnologiyakh [Dynamic effects in statically indeterminate physically and

structurally nonlinear systems]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2022;(9):42-51. doi: 10.33622/0869-7019. (rus)

3. Tamrazyan A.G. Ustalostnoye povedeniye gibkikh zhelezobetonnykh balok pri montazhe [Fatigue behavior of bending reinforced concrete beams under corrosion]. *Zhelezobetonnyye konstruktsii*. 2024;6(2):22-34. (rus)

4. Bondarenko V.M. Korrozionnyye povrezhdeniya kak prichina lavinnogo razrusheniya zhelezobetonnykh konstruktsiy [Corrosion damage as a cause of avalanche failure of reinforced concrete structures]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy*. 2009;5(226):13-17. (rus)

5. Kudryavtsev M.V., Tamrazyan A.G. Metodika opredeleniya nesushchey sposobnosti korrozionno-povrezhdonnykh kolonn pri seismicheskikh vozdeystviyah [Methodology for Determining the Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Columns under Seismic Impacts]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2024;24(1):20-27. (rus)

6. Tamrazyan A.G. Nesushchestvennaya zheleznaya sposobnost' korrozionno-povrezhdennykh izgibayemykh elementov, sootvetstvuyushchikh trebovaniyam ognevogo vozdeystviya [Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Bendable Reinforced Concrete Elements Subjected to Fire Exposure]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2022;(4):130-137. (rus)

7. Sun J.-M., Yi W.-J., Chen H., Peng F., Zhou Y., Zhang W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. *Journal of Structural Engineering*. 2023;149(1). DOI:10.1061/j.sendh/steng-11612.

8. Zhang W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., Gu X.-L. Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling. *Structural Safety*. 2021;88. DOI:10.1016/j.strusafe.2020.102037.

9. Zhao W., Qian J. Resistance mechanism and reliability analysis of reinforced concrete columns subjected to lateral impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020;136. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.103413.

10. Puzankov Yu.I. *Prochnost' i deformativnost' szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri poperechnoy dinamicheskoy nagruzke* [Strength and deformability of compressed reinforced concrete elements under transverse dynamic loading]: PhD thesis. Moscow: Moscow Order of the Red Banner of Labor Civil Engineering Institute named after V.V. Kuybyshev, 1979. (rus)

11. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Hajiloo H. Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis. *Construction and Building Materials*. 2021;284. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.

12. He S., Cao Z., Ma J., Zeng S., Li P., Wang H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021. DOI:10.1155/2021/6693224.

13. Bondarenko V.M. Osobennosti silovogo sопротивления povrezhdennykh korroziyey zhelezobetonnykh elementov znakoperemennomu nagruzeniyu [Features of the force resistance of corrosion-damaged reinforced concrete elements to alternating loading]. *Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2011;(1):30-38. (rus)

14. Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Modelirovaniye velichiny korrozionnykh povrezhdeniy armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy v usloviyakh khloridnoy aggressivnoy sredy [Modeling the magnitude of corrosion damage to the reinforcement of reinforced concrete structures in an aggressive chloride environment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017;1(70):43-49. (rus)

15. Yu X.-H., Dai K.-Y., Li Y.-S. Variability in corrosion damage models and its effect on seismic collapse fragility of aging reinforced concrete frames. *Construction and Building Materials*. 2021;295. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123654.

16. Fernandez I., Bairán J.M., Marí A.R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and $\sigma-\epsilon$ behavior. *Construction and Building Materials*. 2015;101:772-783. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.139.

17. Aminulai H.O., Robinson A.F., Ferguson N.S., Kashani M.M. Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading. *Engineering Structures*. 2023;289:116245. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.116245.

18. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dinamika bezbalochnykh zhelezobetonnykh karkasov sooruzheniy pri povrezhdeniyakh plit prodavlivanym [Dynamics of beam-free reinforced concrete frames of structures with slab damage due to punching]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021;4(96):23-34. (rus)

19. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M. Criterion of Crack Resistance of Corrosion Damaged Concrete in Plane Stress State. *Procedia Engineering*. 2015;117(1):179-185. DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.144.

20. Nasser H., Van Steen C., Vandewalle L., Verstryng E. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Construction and Building Materials*. 2021;286. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.

21. Alekseytsev A.V., Yurusov K.V. Issledovaniye nesushchey sposobnosti korrozionno-povrezhdayemykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri poperechnom deystviyu impul'snoy nagruzki [Study of the bearing capacity of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under transverse impulse load]. *Vestnik MGСU*. 2025;20(5):667-682. (rus)

22. Yu X., Robuschi S., Fernandez I., Lundgren K. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. *Engineering Structures*. 2021;239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112309.

23. Chen S., Duffield C., Miramini S., Raja B.N.K., Zhang L. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. *Engineering Structures*. 2021;237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112143.
24. Luo Y., Zheng H., Zhang H., Liu Y. Fatigue reliability evaluation of aging prestressed concrete bridge accounting for stochastic traffic loading and resistance degradation. *Advances in Structural Engineering*. DOI:10.1177/13694332211017995.
25. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnykh vnetsentrenno szhatykh elementov karkasov zdaniy pri korrozionnykh povrezhdeniyakh v usloviyakh osobykh vozdeystviy [Bearing capacity of reinforced concrete eccentrically compressed elements of building frames under corrosion damage under special influences]. *Zhelezobetonnyye konstruktsii*. 2023;1(1):46-54. (rus)
26. Bojorquez J., Ponce S., Ruiz S.E., Bojorquez E., Reyes-Salazar A., Barraza M., Chavez R., Valenzuela F., Leyva H., Baca V. Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects. *Engineering Structures*. 2021;237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112161.
27. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelineynoy postanovke dinamicheskogo povedeniya ploskikh ram pri zaproyektivnykh vozdeystviyakh [Analysis of the dynamic behavior of flat frames under beyond-design-basis loads in a geometrically, physically, and structurally nonlinear formulation]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2012;(10):49-51. (rus)
28. Zhao W., Ye J. Dynamic behavior and damage assessment of RC columns subjected to lateral soft impact. *Engineering Structures*. 2022;251. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113476.
29. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Mahdavi G., Hariri-Ardebili M.A. Dynamic behavior of corroded RC slabs with macro-level stochastic finite element simulations. *Engineering Structures*. 2021;239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112056.
30. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete. *Engineering Structures*. 2021;226. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111392.
31. Kurchenko N.S., Grishkov V.A. K otsenke zhestkosti korrozionno-povrezhdayemykh zhelezobetonnykh balok [On the assessment of the rigidity of corrosion-damaged reinforced concrete beams]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022;9(93):112-123. (rus)

Информация об авторах

Алексеев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,

г. Москва.

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

Тел. 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: aalexw@mail.ru

Юрусов Константин Валерьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва.

аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: walrk@mail.ru

Information about authors

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering

Doctor of Engineering, Prof. of Department "Reinforced concrete and stone structures"

Ph.: 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: aalexw@mail.ru

Yurusov Konstantin V.

Moscow State University of Civil Engineering

post-graduate student of department "Reinforced concrete and stone structures"

E-mail: walrk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2025

Одобрена после рецензирования 01.10.2025

Принята к публикации 11.10.2025

The article was submitted 26.09.2025

Approved after reviewing 01.10.2025

Accepted for publication 11.10.2025