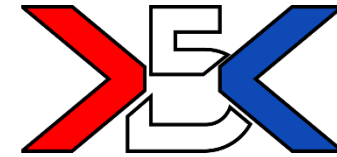




НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра железобетонных
и каменных конструкций
НИУ МГСУ

Кудрявцев Максим Владимирович

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ
СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Специальность 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

**Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки РФ,
д.т.н., проф. Тамразян Ашот Георгиевич**

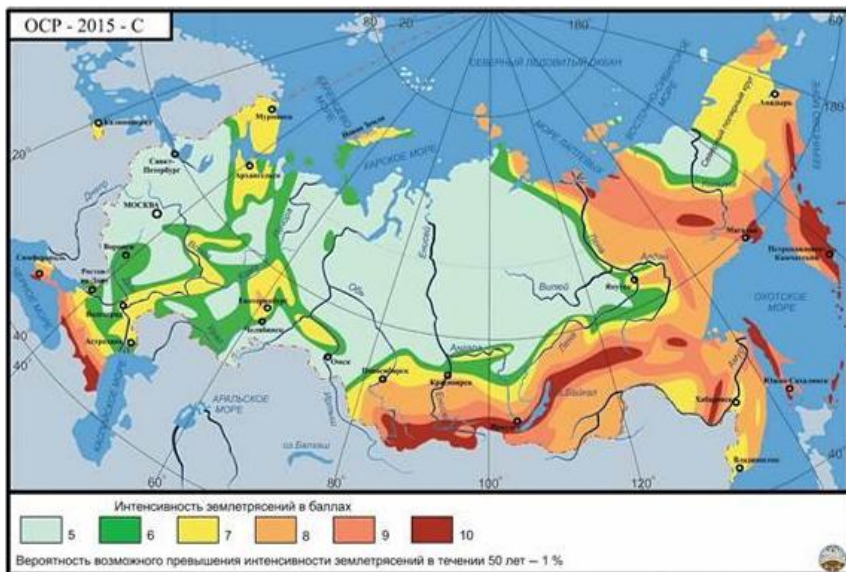
Москва 2026

- Одним из самых распространенных дефектов железобетонных конструкций является коррозионное повреждение бетона и арматуры
- До 25% территорий Российской Федерации входят в сейсмически опасные зоны.
- Несущая способность конструкций с повреждениями снижается и может привести к обрушению при сейсмическом воздействии.
- Возникает необходимость в разработке метода расчета железобетонных конструкций зданий на сейсмическое воздействие с учетом повреждений несущих элементов.

Научно–техническая гипотеза исследования состоит в предположении, что при воздействии знакопеременных, малоцикловых нагрузок типа сейсмических на коррозионно-поврежденные сжатые железобетонные элементы, снижение несущей способности зависит от степени коррозии и нарушения сцепления арматуры с бетоном, а также гибкости арматурных стержней в этих условиях.

Объектом исследования являются коррозионно-поврежденные сжатые железобетонные элементы, воспринимающие знакопеременные малоцикловые горизонтальные (типа сейсмических) воздействия.

Предметом исследования является несущая способность, пластичность, жесткость и диссипативность сжатых железобетонных элементов с коррозионным повреждением арматурных стержней при знакопеременном малоцикловом нагружении.



Карта ОСР-2015

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

Задачи исследования:

- анализ исследований сейсмостойкости поврежденных сжатых железобетонных элементов отечественных и зарубежных авторов;
- разработка методики расчета огибающей несущей способности коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов с учетом снижения сцепления арматуры с бетоном;
- оценка изменения жесткости железобетонного сжатого элемента при коррозии арматурных стержней;
- проведение экспериментальных исследований сжатых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при знакопеременном горизонтальном нагружении;
- исследование динамических характеристик экспериментальных образцов в зависимости от степени коррозионных повреждений арматуры;
- проведение сравнительного анализа полученных экспериментальных данных коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при знакопеременном нагружении и их численных моделей в программном комплексе LS DYNA;
- исследование влияния коррозионных повреждений арматуры на сейсмостойкость железобетонного каркаса в программном комплексе ЛИРА САПР.

Научную новизну работы составляют:

- разработанная методика расчета несущей способности коррозионно-поврежденных внецентренно сжатых железобетонных элементов при сейсмических воздействиях, учитывающих снижение сцепления арматуры с бетоном;
- оценка влияния коррозии арматуры на пластичность и гистерезисную диссипацию энергии поврежденных колонн на основе анализа экспериментальных исследований внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при знакопеременном малоцикловом нагружении типа сейсмического;
- динамические характеристики сжатых железобетонных образцов в зависимости от степени коррозионных повреждений арматуры, полученных по результатам экспериментальных исследований;
- определение момента трещинообразования в колонне по значениям жесткости расчетного сечения в зависимости от степени коррозионных повреждений;
- определение устойчивости коррозионно-поврежденных сжатых арматурных стержней, полученных по результатам экспериментальных исследований;
- результаты по оценке сейсмостойкости железобетонного каркаса с коррозионными повреждениями арматуры и уточнению коэффициента допускаемых повреждений.

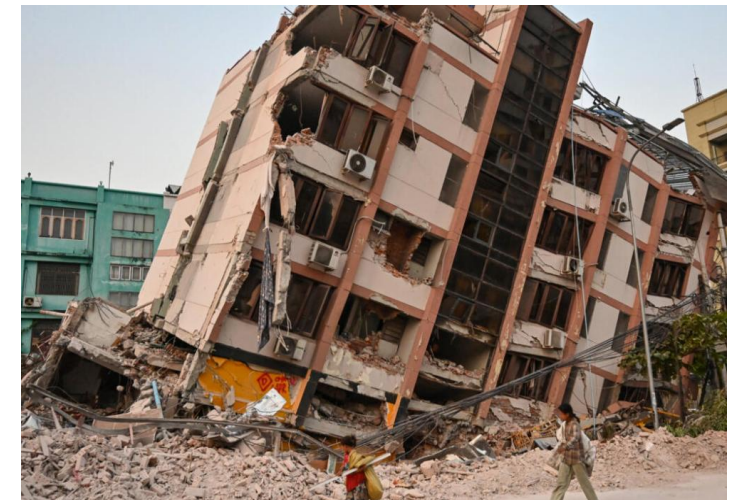
- Исследованиям работы коррозионно-поврежденных железобетонных элементов посвящены работы Берлинова М.В., Бондаренко В.М., Гузеева, Е.А., Дронова А.В., Колчунова В.И., Король Е.А., Мацеевич Т.А., Меркулова С.И., Пахомовой Е.Г., Попеско А.И., Попова Д.С., Прокоповича А.А., Смоляго Г.А., Степановой В.Ф., Тамразяна А.Г., Федоровой Н.В. и др.
- Изучением сейсмостойкости железобетонных конструкций занимались отечественные и зарубежные ученые Айзенберг Я.М., Белостоцкий А.М., Грановский А.В., Жарницкий В.И., Зенин С.А., Кабанцев О.В., Ласьков Н.Н., Мкртычев О. В., Расторгуев Б.С., Тамразян А. Г., Тонких Г.П., Травуш В.И., Трекин Н.Н., Хачиян Э.Е., Da-Gang Lu, Kuang-Yu Dai, Xiao-Hui Yu и др.
- Влиянием различных повреждений на динамические параметры конструкций зданий занимались Нуриева Д.М., Пшеничкина В.А., Трифонов О.В., Федоров В.С., Копаница Д.Г., Кумпьяк О.Г., На Т., Hong L. L., Kang S.-H, Lagomarsino S., Velani Pulkit Dilip и др.



Коррозионные трещины в колонне

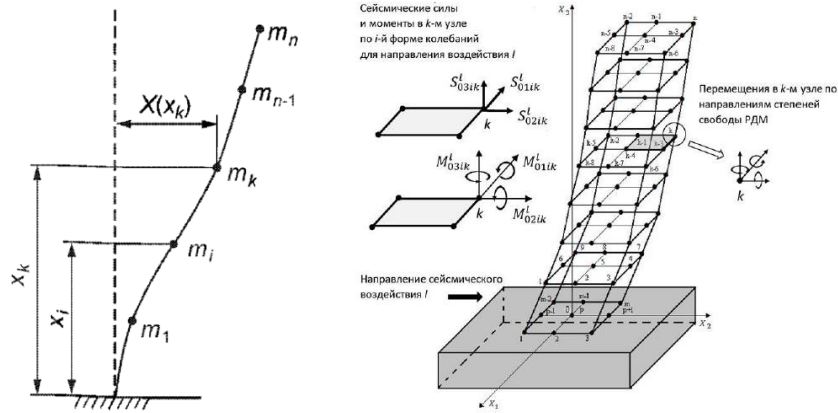
Влияние степени повреждения конструкции от изменения частоты колебаний

| Степень повреждения, техническое состояние по ГОСТ 31937 | Уменьшение частоты собственных колебаний, % |
|--|---|
| 1 – без повреждения / легкая – проектное | 0–10 |
| 2 – умеренная – работоспособное | 11–30 |
| 3 – сильная – ограниченно–работоспособное | 31–60 |
| 4 – тяжелая – аварийное | 61–90 |
| 5 – катастрофическая – аварийное | 91–100 |



Последствия землетрясения в Турции, 2024 г. 5

Линейно-спектральный метод (СП 14.13330.2018)



Расчетная динамическая модель (РДМ)

$$S_{ik}^j = K_0 \cdot K_1 \cdot S_{oik}^j,$$

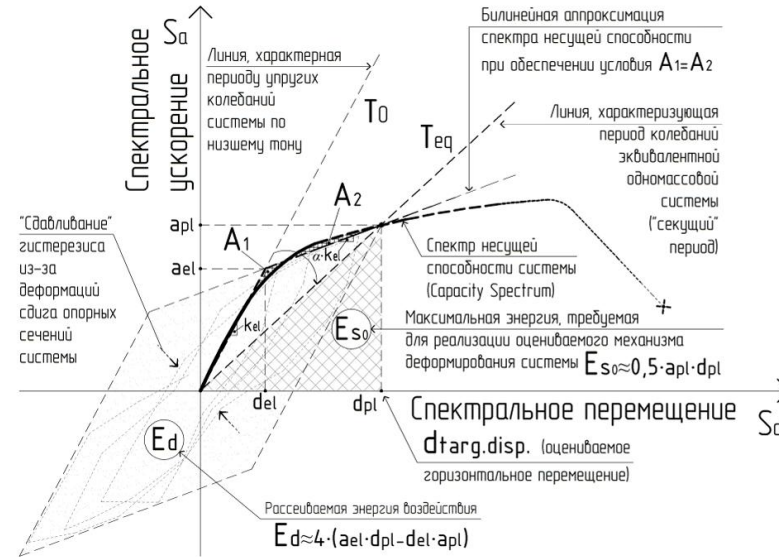
K_0 - коэффициент назначения сооружения;

K_1 -коэффициент допускаемых повреждений; S_{oik}^j - сейсмическая нагрузка i-ой формы колебаний.

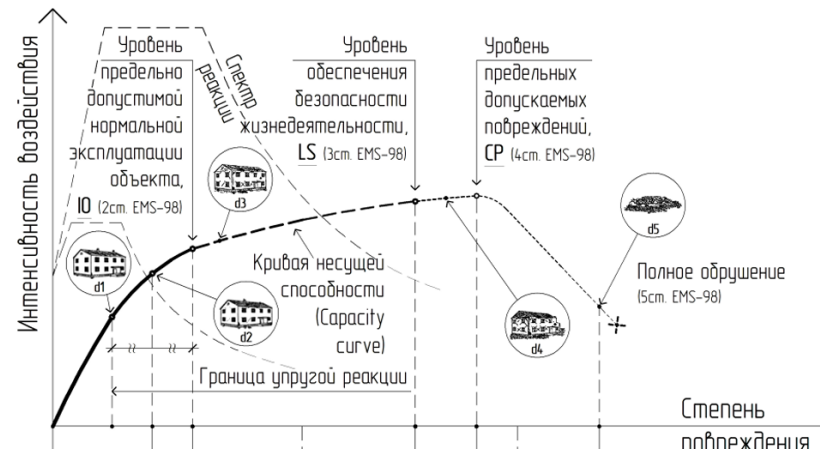
$$S_{oik}^j = m_k^j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot \eta_{ik}^j,$$

m_k^j - масса в точке k по координате j; η_{ik}^j -коэффициент формы колебаний; A – ускорение в уровне основания; K_ψ - коэффициент, учитывающий диссипативные свойства сооружения; βI – коэффициент динамичности.

Нелинейный статический метод (Pushover Analysis)



Определение спектра реакции

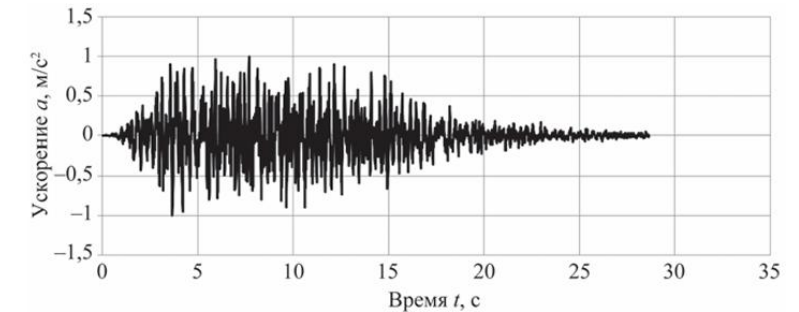


Определению точки поведения конструкции

Нелинейный динамический метод расчета сейсмостойкости

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F^a,$$

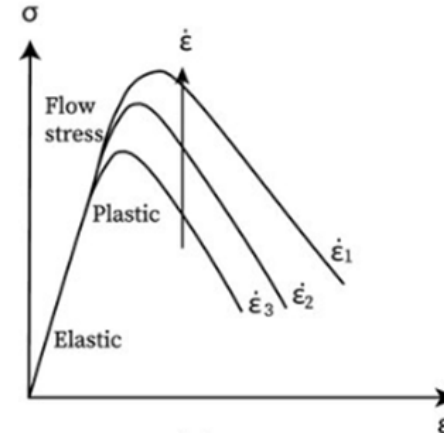
где u – вектор узловых перемещений, \dot{u} – вектор узловых скоростей, \ddot{u} – вектор узловых ускорений, M – матрица масс системы, C – матрица демпфирования, K – матрица жесткости, F^a – вектор действующих на систему нагрузок.



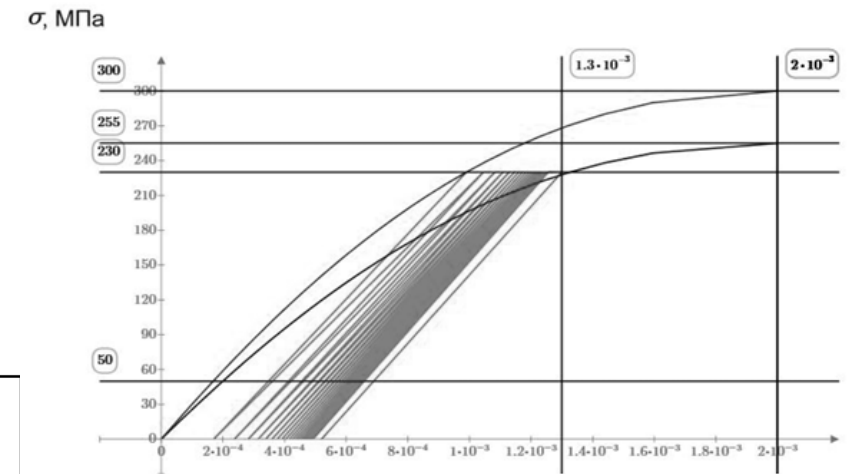
Акселерограмма землетрясения

Работа бетона:

1. Малоцикловая прочность при сжатии:
 - накопление деформаций и повреждений при повторных нагружениях;
 - снижение модуля упругости от повторных нагружений;
 - разрушения от критического количества циклов нагружения.
2. Динамическая прочность при сжатии:
 - увеличение прочности при динамическом ударе $K_d > 1$;
 - снижение прочности коррозионно-поврежденного бетона при динамическом ударе $K_d < 1$.



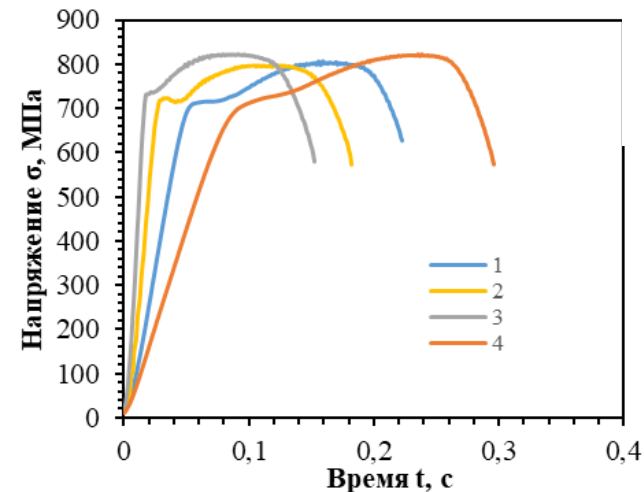
Прочность бетона при динамике



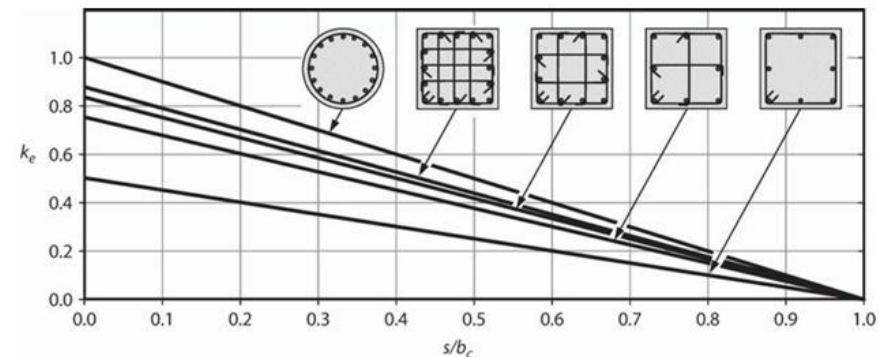
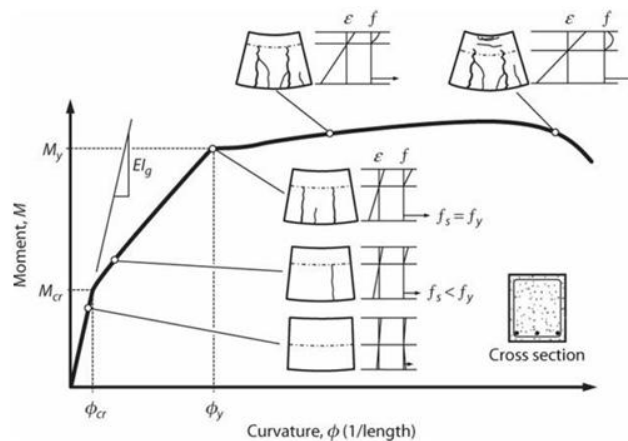
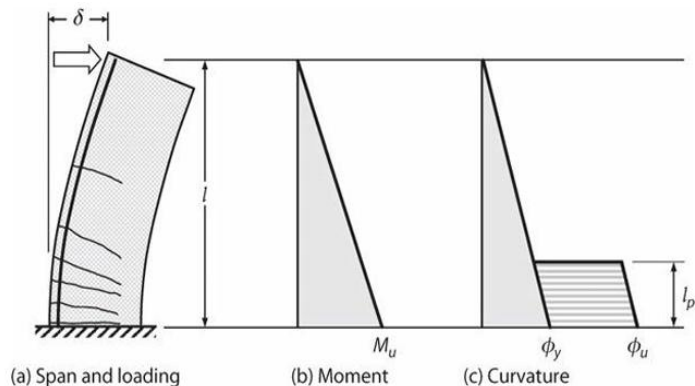
Накопление деформаций при циклической нагрузке в бетоне

Работа арматуры:

1. Малоцикловая прочность при растяжении/сжатии:
 - образование наклёпа;
 - проявление эффекта Баушингера;
 - разрушения от критического количества циклов нагружения.
2. Динамическая прочность при растяжении:
 - увеличение предела текучести и снижение деформаций при уменьшении скорости динамического воздействия;
 - проявление охрупчивания и снижения пластичности коррозионно-поврежденной арматуры при растяжении.



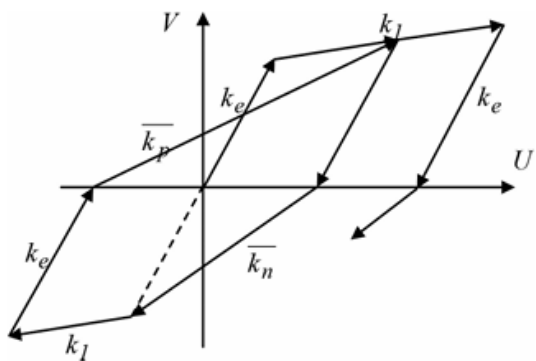
Прочность арматуры при динамике



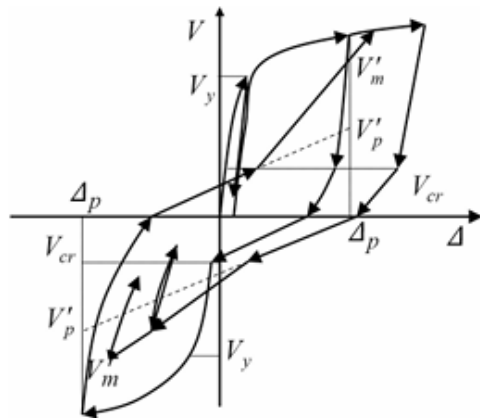
Влияние параметров колонн на эффективное боковое обжатие

Модель образования пластического шарнира

Определение параметрических точек несущей способности элемента



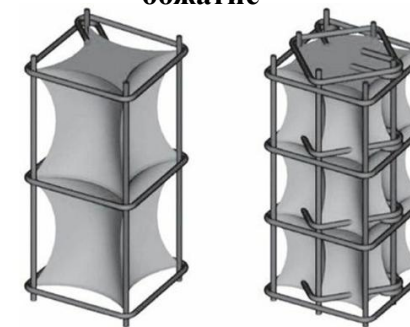
Кусочно-линейная модель гистерезиса



Криволинейная модель гистерезиса



Кусочно-линейная модель огибающей гистерезиса



Модель ограниченного бетона

$$R'_b = R_b + 4,1R_e$$

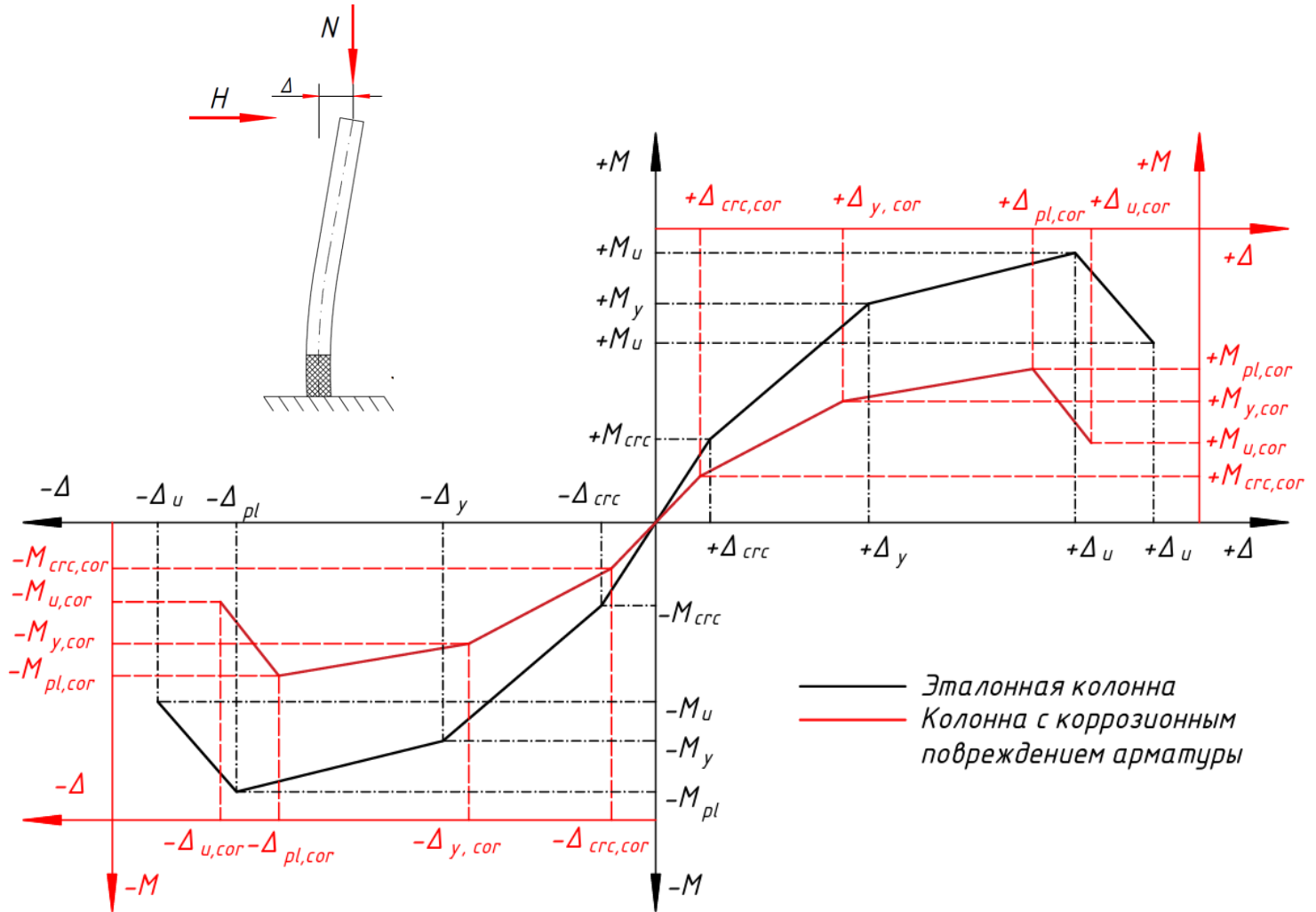
$$R_e = k_e \rho_s R_{sw}$$

$$k_e = \frac{n_l - 2}{n_l} (1 - s_w/b_c)$$

$$\rho_s = \frac{A_{sw}}{b_c s_w}$$

Предпосылки расчета:

- эпюра деформаций нормального сечения принимается билинейной из-за нарушения сцепления арматуры с бетоном;
- высота сжатой зоны с учетом снижения сцепления арматуры в бетоне принимается трапецевидной;
- для бетона, ограниченного поперечными хомутами, принята прочность ограниченного бетона R'_b ;
- при определении момента трещинообразования (M_{crc}) не учитывается вклад бетона защитного слоя вокруг коррозионно-поврежденной арматуры в нахождении расчетного момента инерции;
- в моменте перехода в пластическую стадию работы (M_y), не учитывается вклад отколовшегося слоя бетона вокруг коррозионно-поврежденной арматуры;
- при определении момента потери несущей способности колонны (M_{pl}) защитный слой бетона считается разрушенным, оголенные арматуры считаются как отдельно стоящие стержни;
- перемещения верха колонны определяются из принципа равенства момента в сечении характерной точки огибающей кривой и внешнего момента от действия внешней сил.



Теоретическая модель определения кривой несущей способности внецентренно сжатой колонны

$$M_{crc} = W_{pl}R_{bt} + N \cdot r$$

$$I_{red} = \left[\frac{Bb^3}{12} + 2 \left(\frac{ec^3}{12} + ec \left(\frac{e+c}{2} \right)^2 \right) \right] + n\alpha A_{s,cor} \left(\frac{H}{2} - c \right)^2$$

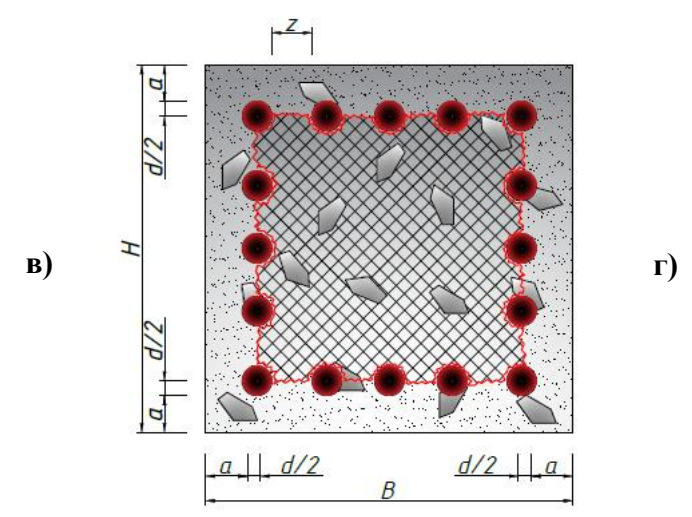
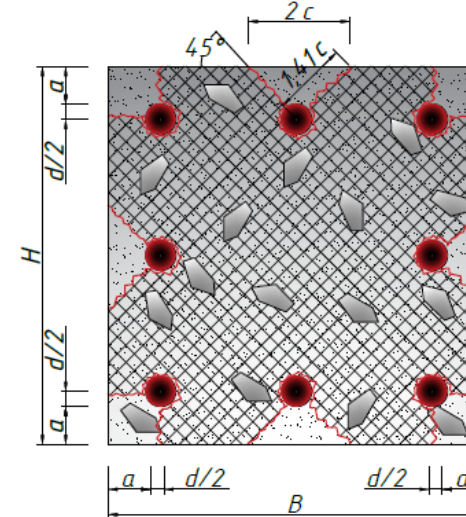
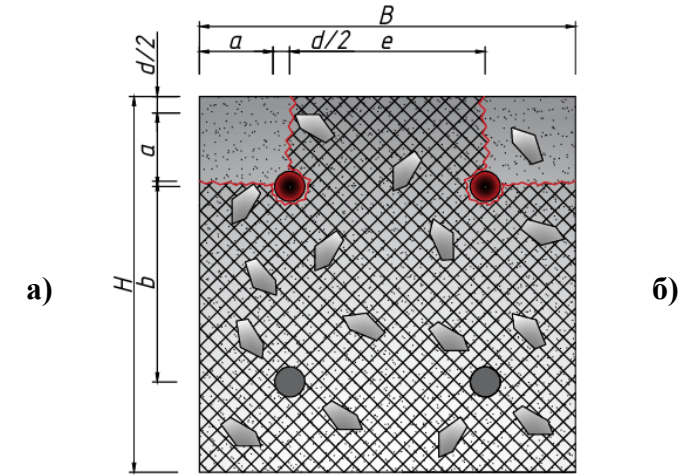
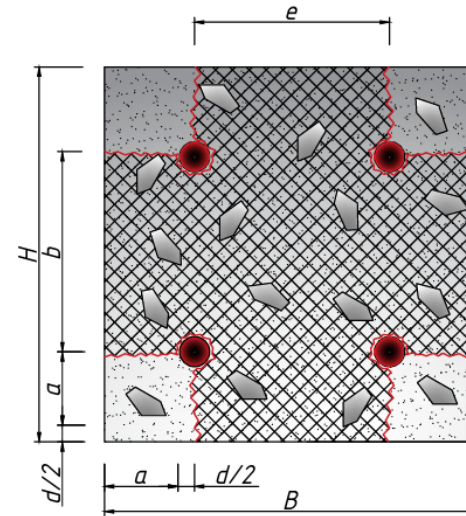
$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_0}$$

$$r = \frac{W_{pl}}{A_{red}}$$

$$A_{red} = (BH - 4c^2) + \alpha(A_{s,cor} + A'_{s,cor})$$

$$W_{pl}R_{bt} + Nr = N\Delta_{crc}$$

$$\Delta_{crc} = \frac{M_{crc}}{N\eta}$$



Расчетное сечение колонн при: а) угловое расположение стержней; б) коррозия арматуры у одной грани; в) равномерное расположение стержней при $Z > 2c$; г) тоже (в) при $Z < 2c$

$$x = x_\phi \omega \quad x_\phi = \beta_0 \xi_m h_0 \quad \beta_0 = 1 - (1 - \beta)^2$$

$$\xi_m = -D/T + \sqrt{(D/T)^2 + K/T}$$

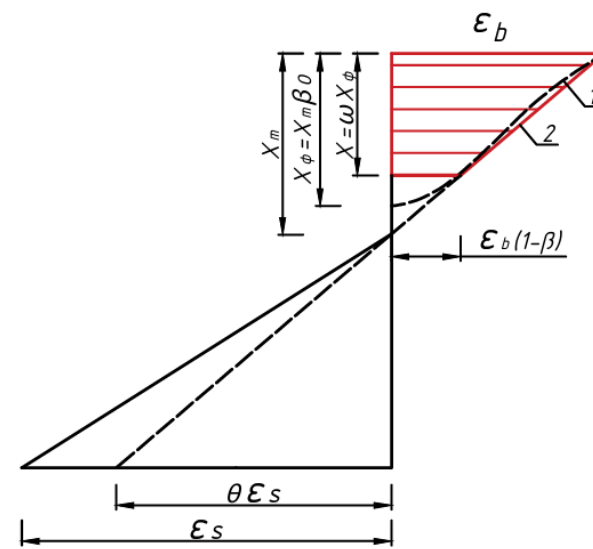
где $\left\{ \begin{array}{l} D = \frac{v_s \mu (\omega_m \alpha - v_b k_s \alpha_{st}) + k_s n'_s}{2}; \\ K = v_s \mu \omega_m \alpha; \\ T = v_b \beta k_s \omega. \end{array} \right.$

$$\alpha_{st} = \frac{\varepsilon_{st} E_{s,cor}}{\sigma_b} \quad \varepsilon_{st} = \frac{\tau_{cor} l_\tau}{d_{s,cor} E_s} \quad k_s = \frac{l_\tau}{n l_{crc}}$$

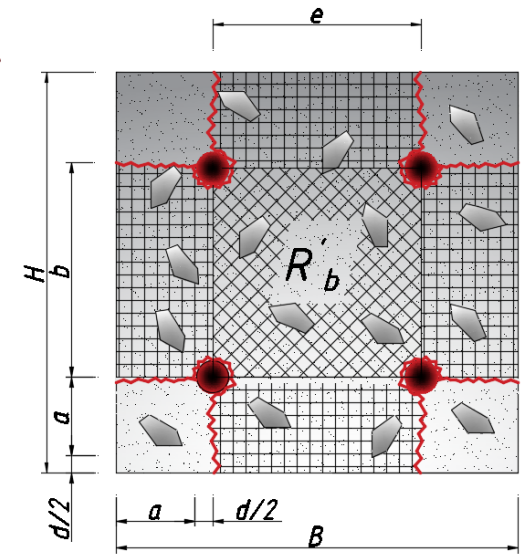
$$\theta = \frac{v_s \mu \alpha (1 - \xi_m)}{v_b \omega \beta (\xi_m^2) + n'_s k_s + v'_s \alpha \mu'}$$

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

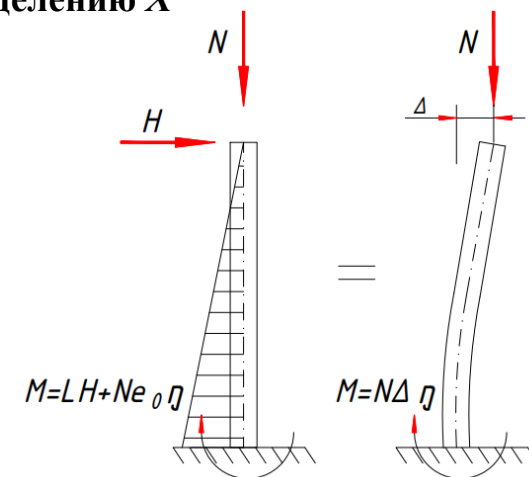
$$M_y = Ne\eta \quad \Delta_y = \frac{M_y}{N\eta}$$



Эпюра деформаций при определению X



Расчетное сечение колонны



Определение горизонтальной деформации

$$\xi_m = -D/T + \sqrt{(D/T)^2 + K/T}$$

где
$$\begin{cases} D = \frac{v_s \mu (\omega_m \alpha) + n'_s}{2}; \\ K = v_s \mu \omega_m \alpha; \\ T = v_b \beta k_s \omega. \end{cases}$$

$$k_s = \frac{l_{pl}}{4h} \geq 1$$

$$N_{cr}^* = n\pi^2 E_{sec} I / l_0^2 \quad l_0 = l_{pl} \mu = \begin{cases} l_{pl} > S_w, l = S_w, \mu = 1 \\ l_{pl} \leq S_w, l = l_p, \mu = 0,7 \end{cases}$$

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

$$M_{pl} = Ne\eta = R'_b (B - 2c) x_\phi \left(h_0 - \frac{x_\phi}{2} \right) + nN_{cr} (h_0 - c)$$

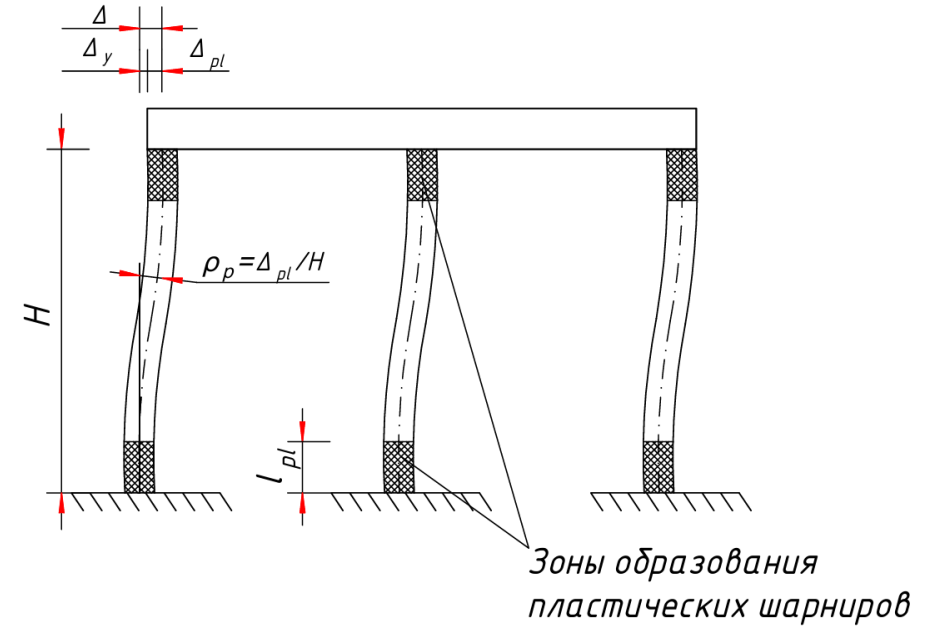


Схема определения горизонтальной деформации

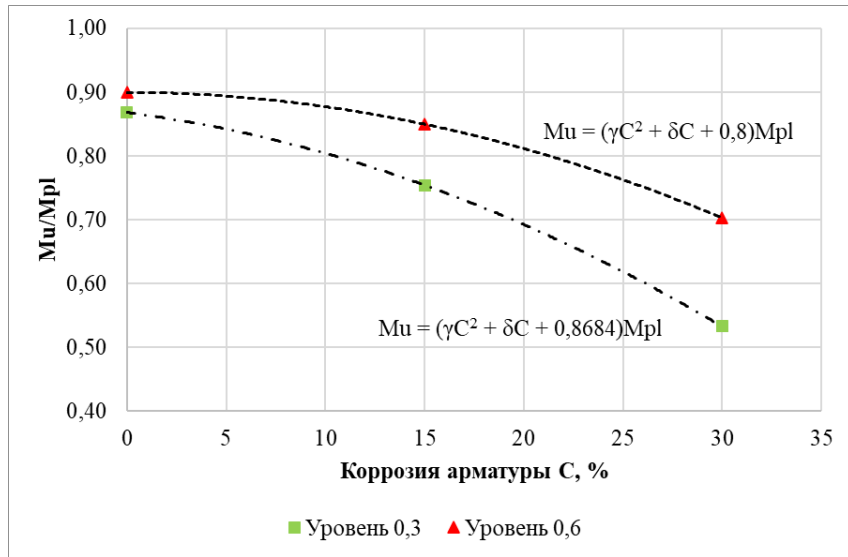
$$\Delta_{pl} = \frac{Mu}{N\eta} \quad \Delta_{pl} = \Delta_y + \Delta_p$$

$$\Delta_p = \rho_p (l - 0,5l_p)$$

$$\rho_p = \rho_b - \rho_s$$

$$\rho_b = \frac{\varepsilon_{b,i}}{x}$$

$$\rho_s = \frac{\varepsilon_{s,i}}{h_0 - x}$$

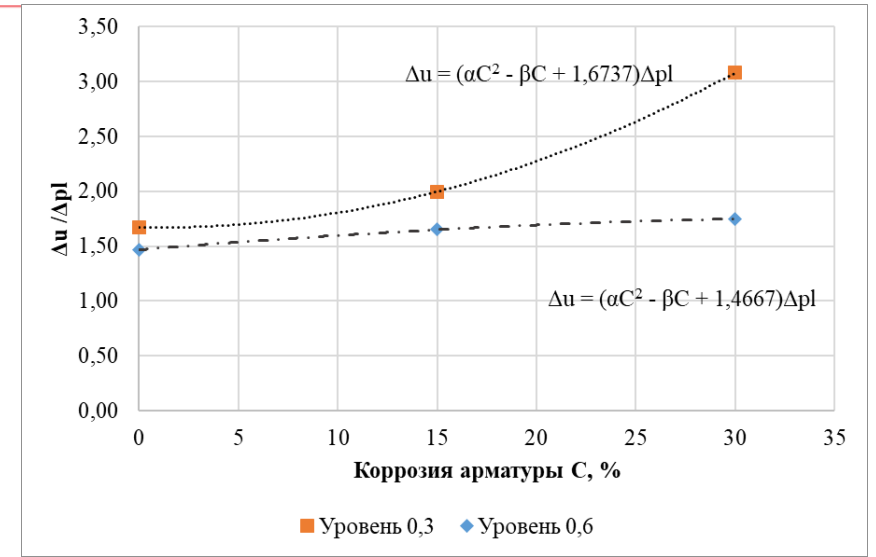


$$M_u^{0,3} = (\gamma C^2 - \delta C + 0,8) M_{pl}$$

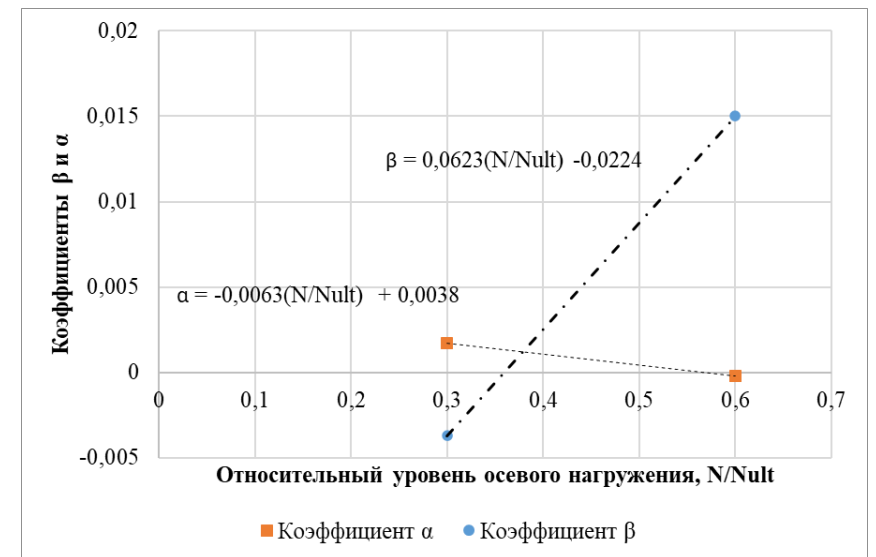
$$M_u^{0,6} = (\gamma C^2 - \delta C + 0,8684) M_{pl}$$

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

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

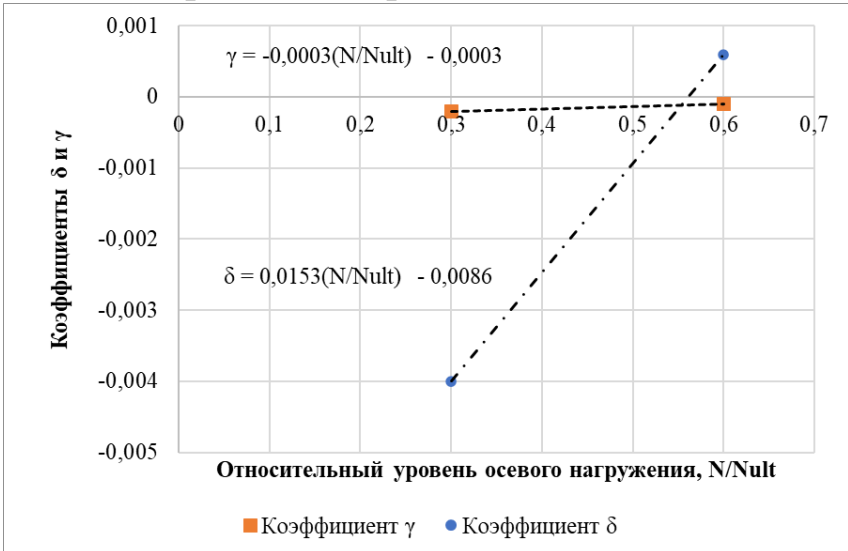


Определение предельной деформации

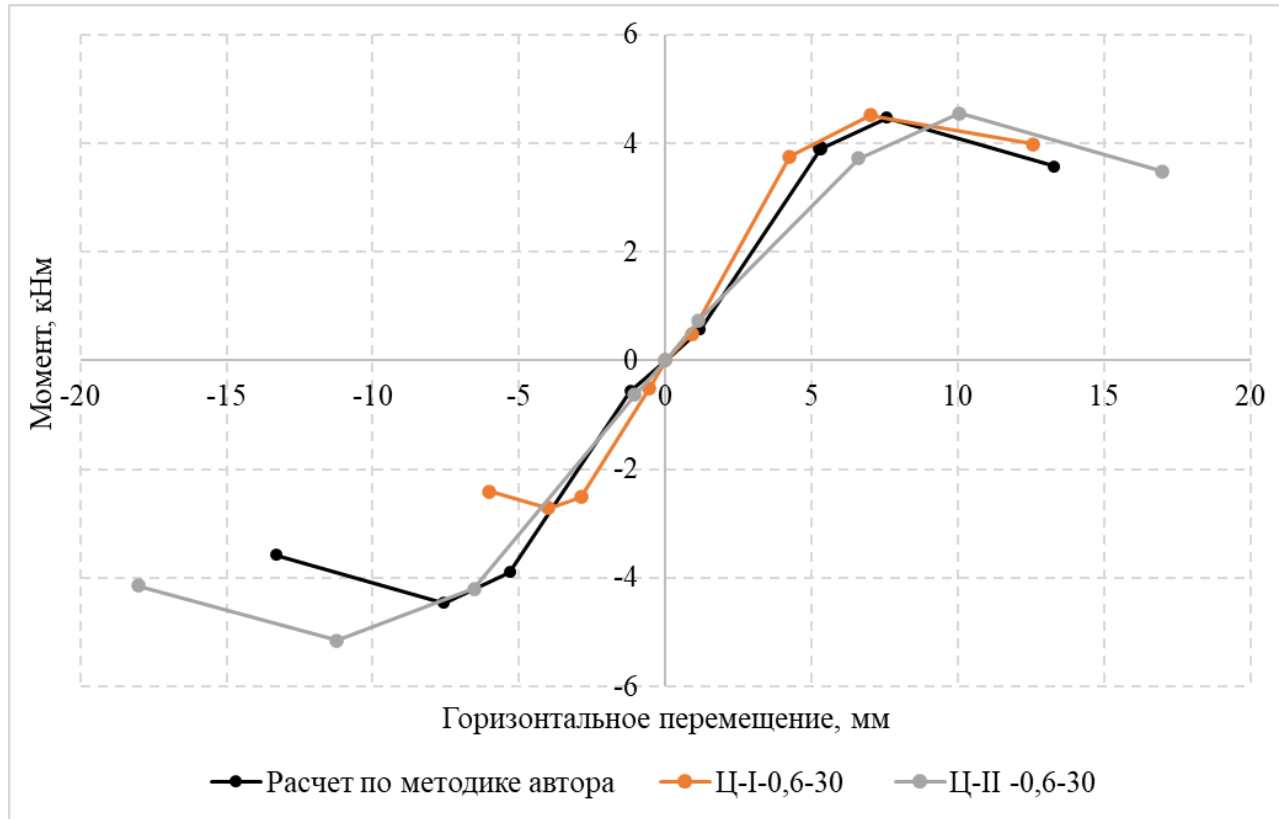


Коэффициенты для определению предельной деформации

Определение предельного момента



Коэффициенты для определению предельного момента



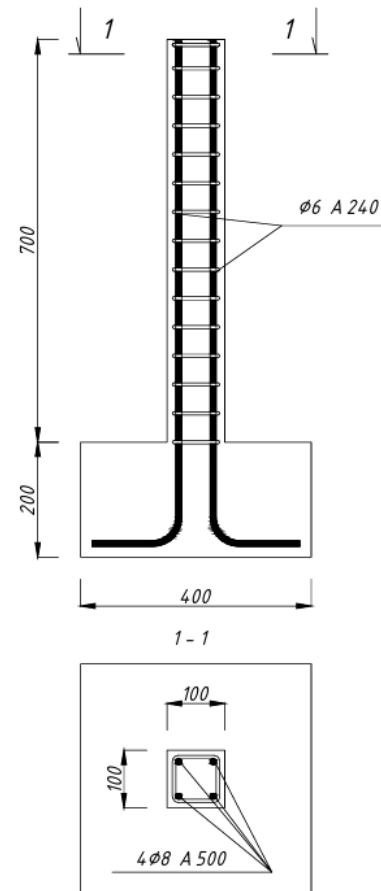
Относительная погрешность между полученными экспериментальными данными и аналитическим расчетом при определении моментов и горизонтальных перемещений составила:

- при определении M_{crc} (3,87%) и Δ_{crc} (17,6%);
- при определении M_y (4,27%) и Δ_y (2,55%);
- при определении M_{pl} (1,44%) и Δ_{pl} (8,45%);
- при определении M_u (3,74%) и Δ_u (8,04%).

Цель испытаний: определение влияния коррозионных повреждений арматуры на несущую способность сжатых железобетонных элементов при знакопеременном малоцикловом нагружении.

Задачи:

- Изготовление железобетонных образцов колонн и стандартных образцов бетона.
- Определение механических характеристик бетона и арматуры.
- Проведение искусственной ускоренной коррозии арматуры в железобетонных образцах колонн.
- Проведение малоцикловых испытаний на образцах колоннах при действии статической вертикальной нагрузки и знакопеременной горизонтальной.
- Оценка влияния коррозионных повреждений арматуры на прочность, пластичность и диссипативность железобетонных колонн.
- Определение и сравнение динамических параметров колонн до и после коррозии арматуры.



Экспериментальные образцы колонны

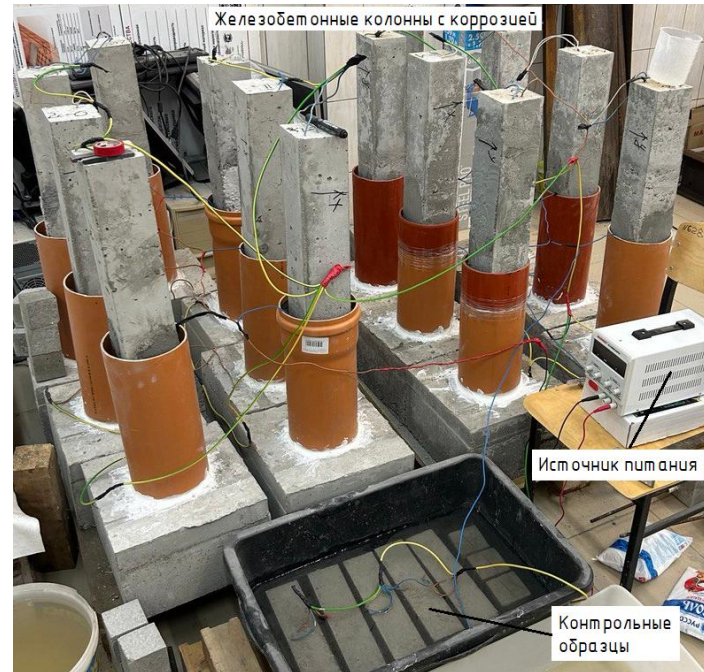
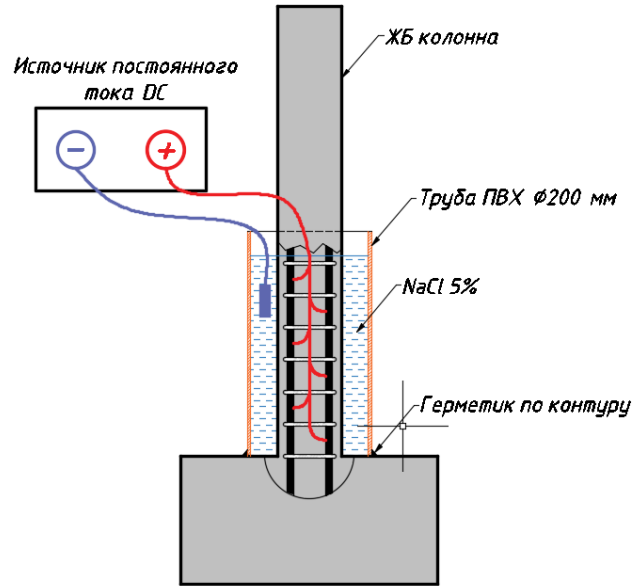


Схема ускоренного корродирования арматуры

Установка для коррозии образцов

$$\mu = \frac{M \cdot i \cdot C_s \cdot t}{F \cdot n_s \cdot \rho_s \cdot \mu \cdot A_s}$$

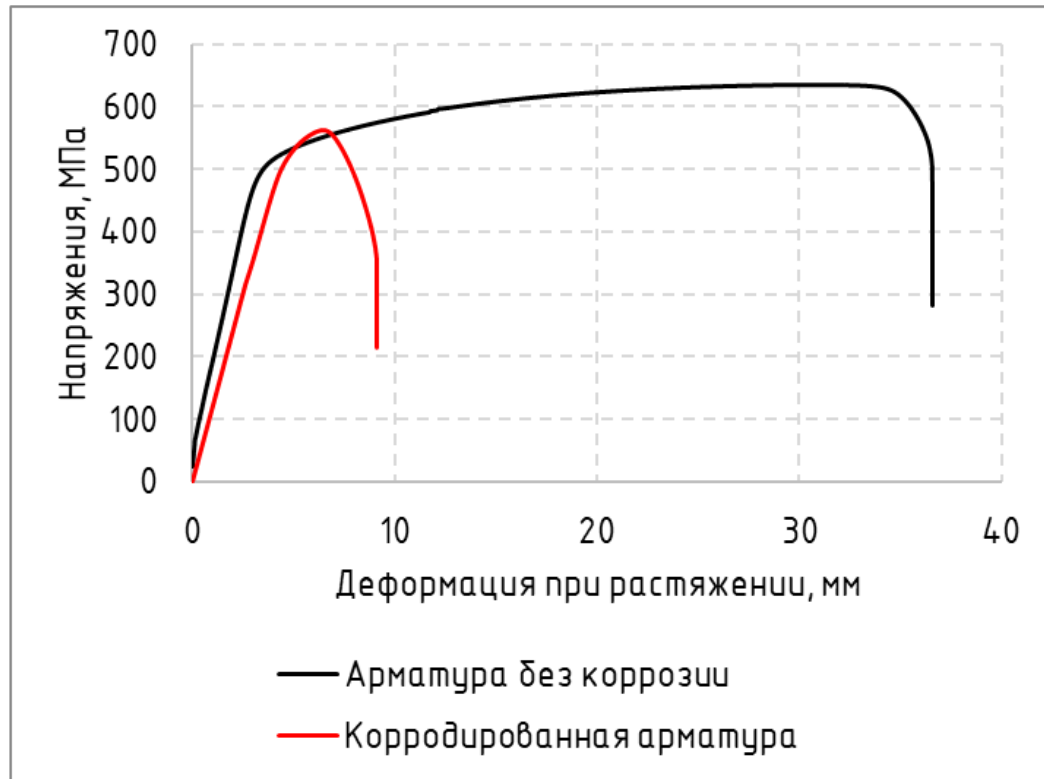
где t – время коррозии, F – постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль), n_s – валентность железа после реакции потери электронов ($n_s = 2$), ρ_s – плотность железа ($\rho_s = 7,85$ г/см³), μ – коэффициент коррозии, A_s – поперечная площадь стержня, M – атомная масса железа ($M = 56$ г/моль), i – плотность электрического тока ($i = A/\text{см}^2$), C_s – длина окружности поврежденной арматуры.

Зависимость диаметра арматуры от массы и длины стержня:

$$D_f = 12,74 \sqrt{\frac{m}{l}}$$

где D_f – фактический диаметр, m – масса стержня, l – длина стержня.





Результаты испытаний арматуры на растяжение

| № | Маркировка | Предел текучести σ_s , (МПа) | Сравнение, % | Временное сопротивление $\sigma_{0.2}$, (МПа) | Сравнение, % |
|---|------------------------|-------------------------------------|--------------|--|--------------|
| 1 | Контрольная A500С 8 мм | 510 | -6% | 634 | -11% |
| 2 | Коррозия A500С 8 мм | 479 | | 563 | |

Определение процента коррозии арматуры

| Время коррозии, сутки | Диаметр стержня (D_f), мм | Площадь сечения (A), мм ² | Процент коррозии по массе, % | Процент коррозии по диаметру, % | Процент коррозии по площади, % |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 8,09 | 51,38 | — | — | — |
| 21 | 7,96 | 49,74 | 4,95 | 1,61 | 3,19 |
| 45 | 7,55 | 44,75 | 14,85 | 6,67 | 12,90 |
| 65 | 6,92 | 37,59 | 28,71 | 14,46 | 26,83 |



Арматура до коррозии



Арматура после коррозии



Испытание бетона на сжатие



Испытание бетона на растяжение при изгибе

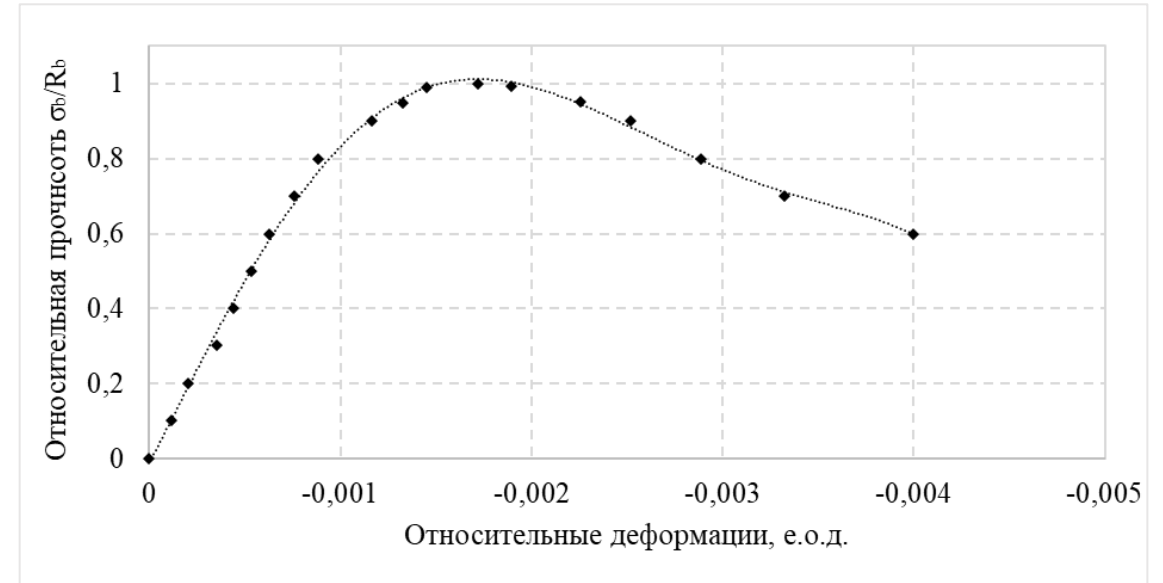


Диаграмма бетона на сжатие

Результаты испытаний бетона на сжатие и изгиб

| № п.п. | Кубиковая прочность, МПа | Призменная прочность, МПа | Прочность при изгибе, МПа |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 23,84 | 16,59 | 2,66 |
| 2 | 22,64 | 17,87 | 3,31 |
| 3 | 24,58 | 20,70 | 3,14 |
| Среднее значение: | 23,68 | 18,39 | 3,04 |

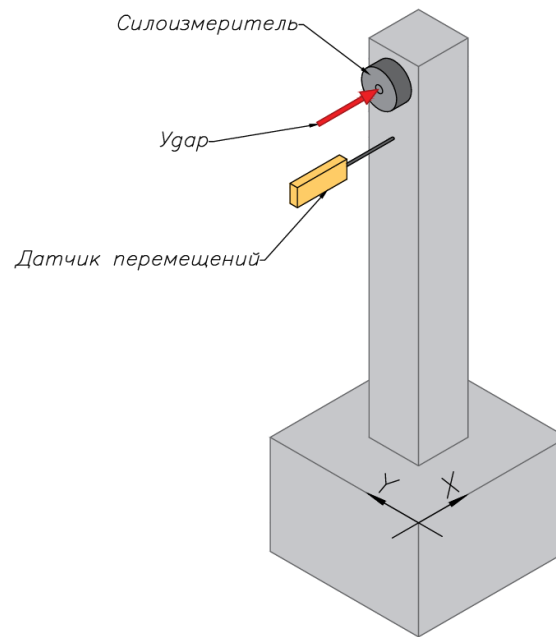
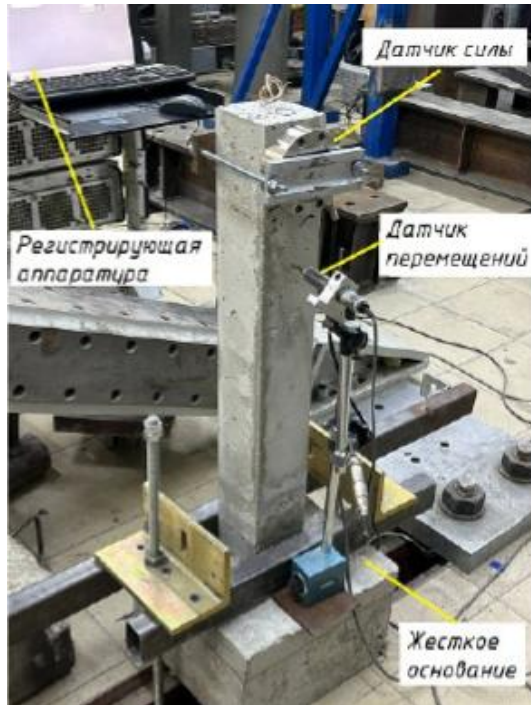


Схема проведения испытания

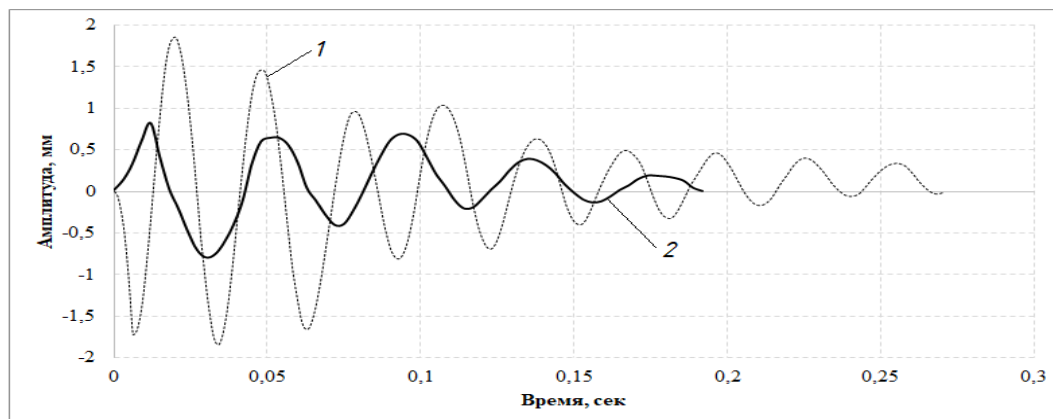
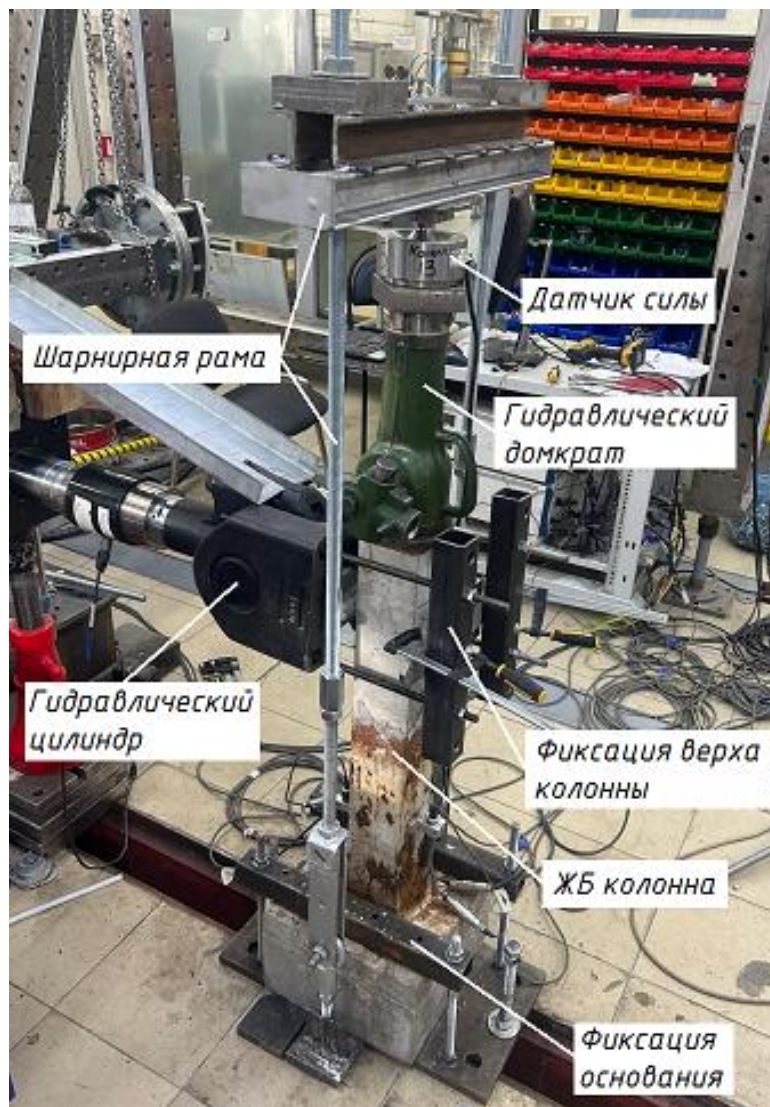


Диаграмма затухания колебаний во времени: 1-без коррозии; 2- с коррозией арматуры

Результаты определения динамических характеристик экспериментальных образцов

| Маркировка образцов | Период (T), с | Первая частота колебаний (v), Гц | Логарифмический декремент колебаний (δ) | Круговая частота (ω), Гц | Коэфф. неупр. сопротивления (γ) | Коэфф. поглощения энергии (ψ) |
|-------------------------------|---------------|----------------------------------|---|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Колонны до коррозии | | | | | | |
| Ц-I-0,3-0 | 0,0265 | 37,75 | 0,251 | 237,050 | 0,080 | 0,502 |
| Ц-II-0,3-0 | 0,0260 | 38,69 | 0,233 | 243,000 | 0,074 | 0,466 |
| Ц-I-0,6-0 | 0,0300 | 33,37 | 0,390 | 209,600 | 0,124 | 0,780 |
| Ц-II-0,6-0 | 0,0265 | 37,75 | 0,232 | 237,050 | 0,074 | 0,464 |
| Ц-I-0,3-0 | 0,0305 | 32,80 | 0,377 | 205,950 | 0,120 | 0,754 |
| Ц-II-0,3-0 | 0,0265 | 37,75 | 0,280 | 237,050 | 0,089 | 0,561 |
| Ц-I-0,6-0 | 0,0275 | 36,47 | 0,373 | 229,050 | 0,119 | 0,747 |
| Ц-II-0,6-0 | 0,0275 | 36,47 | 0,220 | 229,050 | 0,070 | 0,439 |
| Среднее: | 0,0276 | 36,38 | 0,294 | 228,475 | 0,094 | 0,589 |
| Колонны после коррозии | | | | | | |
| Цс-I-0,3-15 | 0,036 | 27,78 | 0,405 | 174,444 | 0,129 | 0,811 |
| Цс-II-0,3-15 | 0,044 | 22,73 | 0,386 | 142,727 | 0,123 | 0,771 |
| Цс-I-0,6-15 | 0,036 | 27,47 | 0,271 | 172,528 | 0,086 | 0,543 |
| Цс-II-0,6-15 | 0,038 | 26,08 | 0,223 | 163,755 | 0,071 | 0,447 |
| Цс-I-0,3-30 | 0,038 | 26,14 | 0,472 | 164,149 | 0,150 | 0,944 |
| Цс-II-0,3-30 | 0,038 | 26,67 | 0,210 | 167,467 | 0,067 | 0,421 |
| Цс-I-0,6-30 | 0,040 | 25,00 | 0,464 | 157,000 | 0,148 | 0,929 |
| Цс-II-0,6-30 | 0,042 | 23,81 | 0,414 | 149,524 | 0,132 | 0,828 |
| Среднее: | 0,039 | 25,71 | 0,356 | 161,449 | 0,113 | 0,712 |



Корродированный образец в испытательной установке

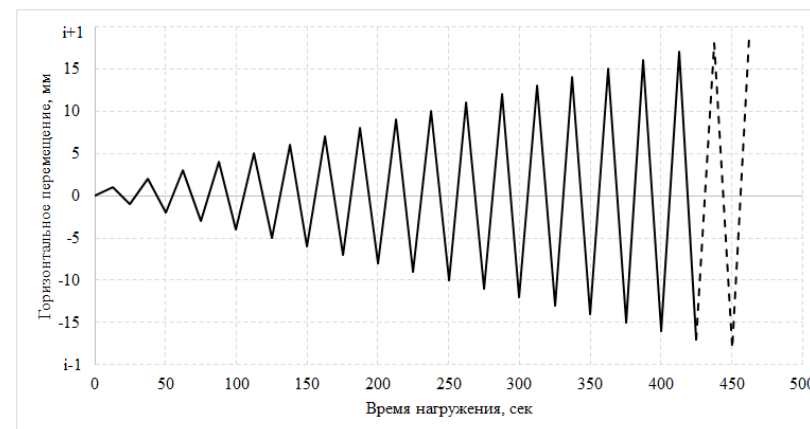


Диаграмма перемещения гидравлического цилиндра

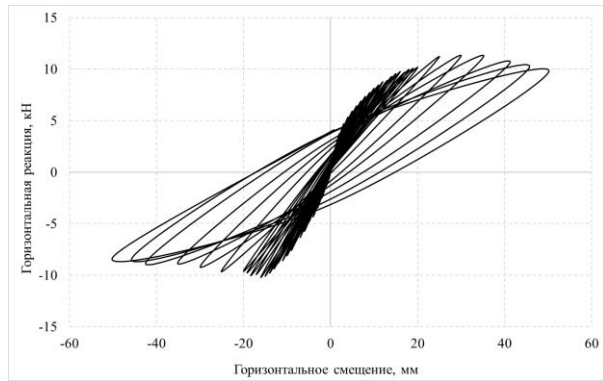


а)

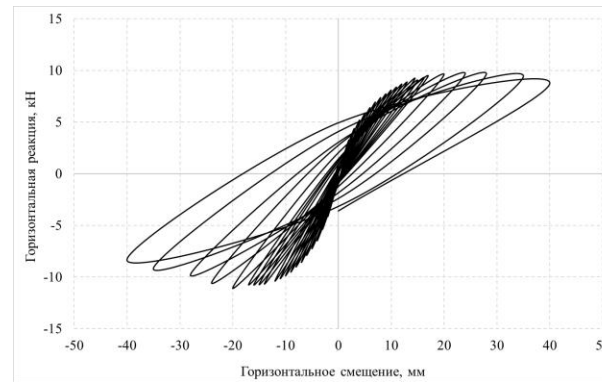


б)

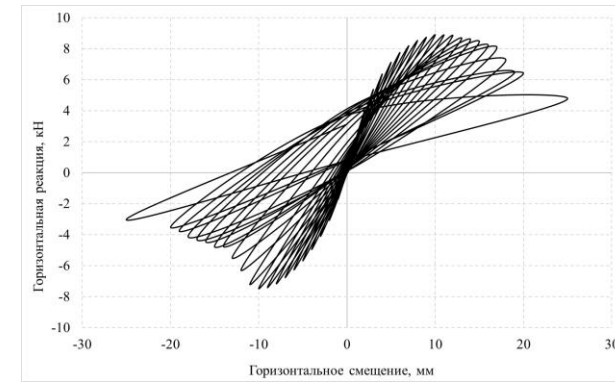
Испытания колонн на центральное сжатие:
а) без коррозии; б) с коррозией



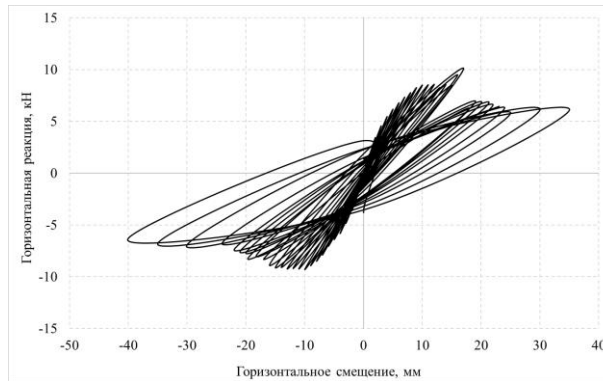
а)



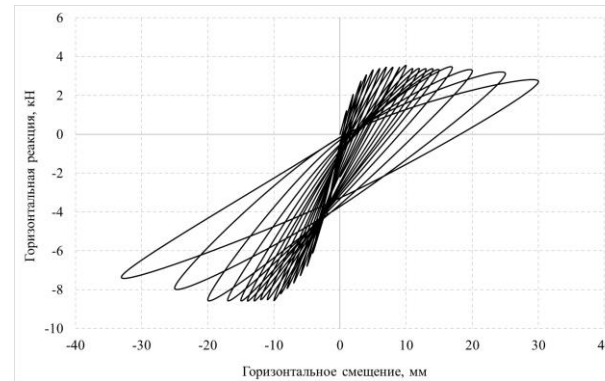
б)



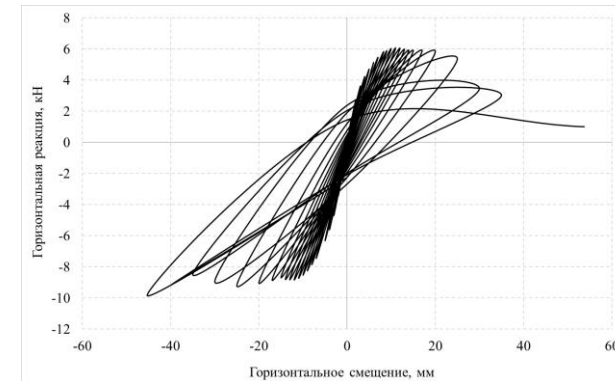
в)



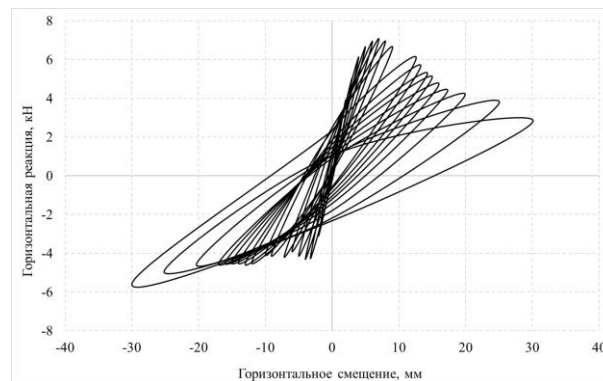
г)



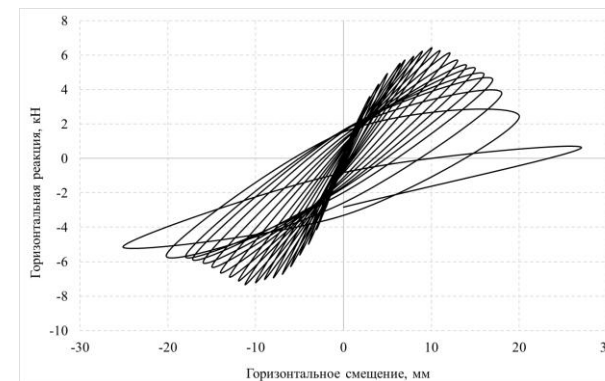
д)



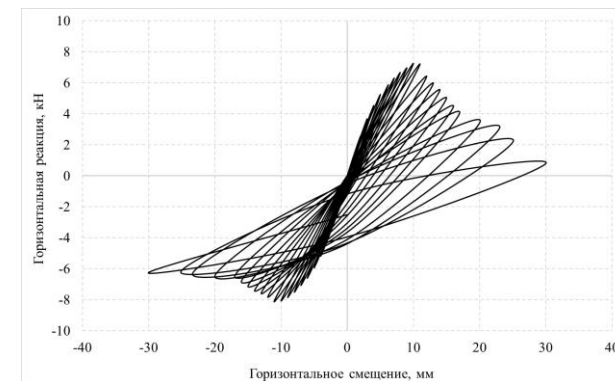
е)



ж)



з)

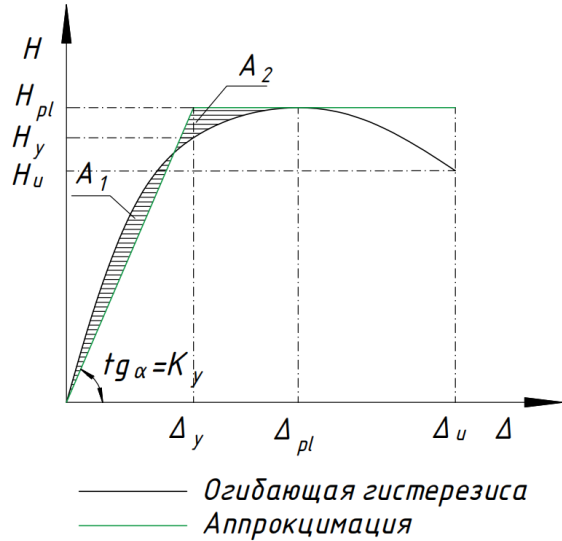


и)

Экспериментальный
гистерезис колонн:

- а) Ц-0,3-0;
- б) Ц-0,6-0;
- в) Цс-I-0,3-15;
- г) Цс-II-0,3-15;
- д) Цс-I-0,3-30;
- е) Цс-II-0,3-30;
- ж) Цс-I-0,6-30;
- з) Цс-II-0,6-30;
- и) Цс-I-0,6-15.

Результаты определения параметрических точек огибающей гистерезиса

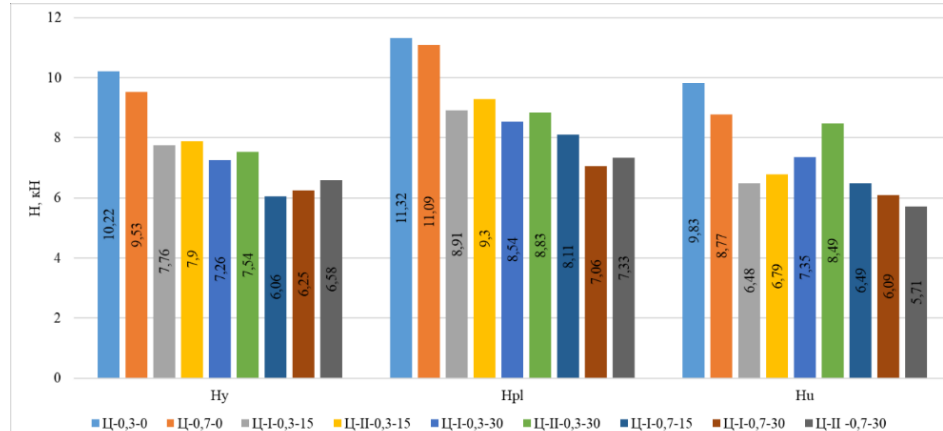
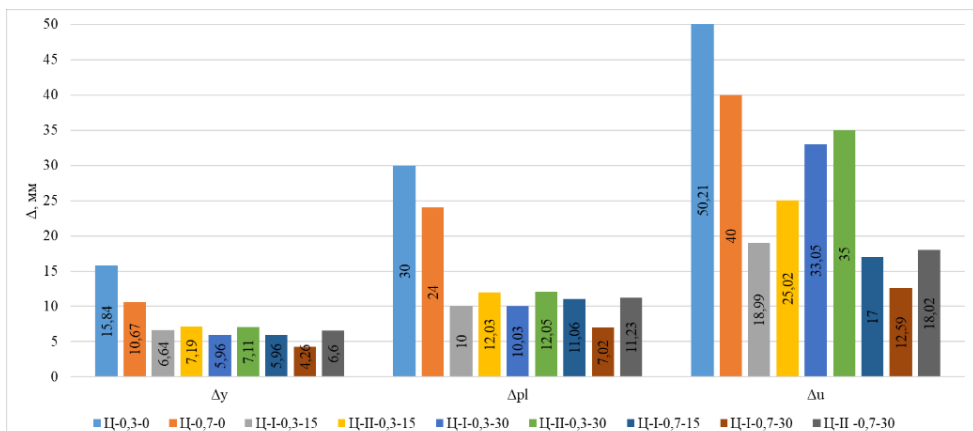


— Огибающая гистерезиса
— Аппроксимация

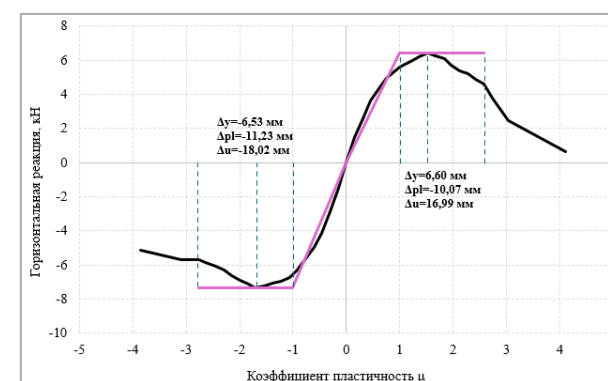
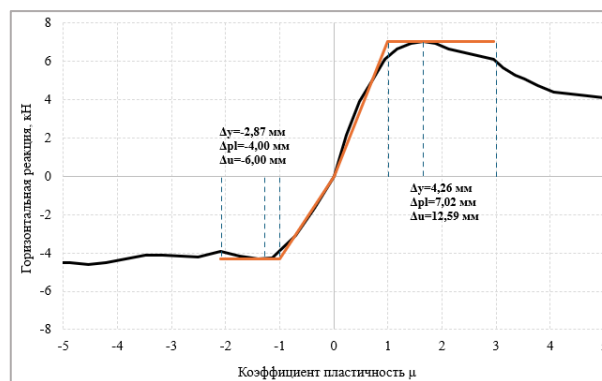
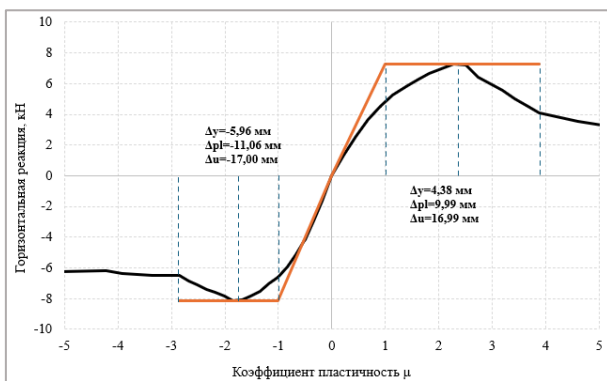
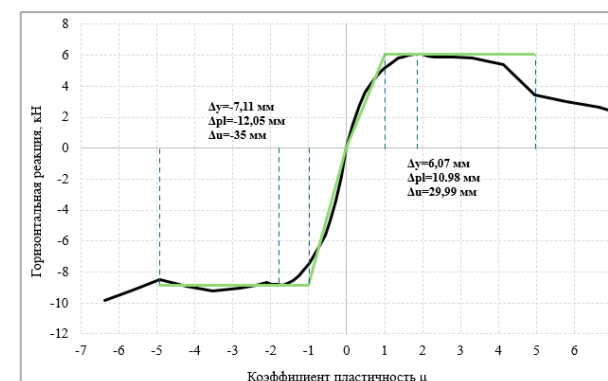
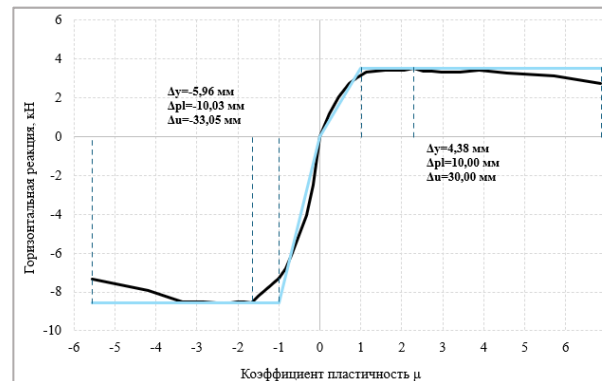
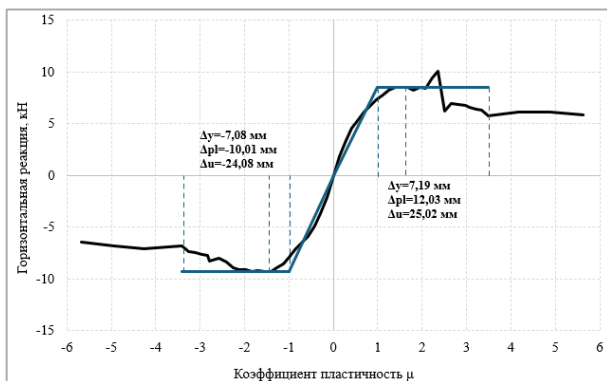
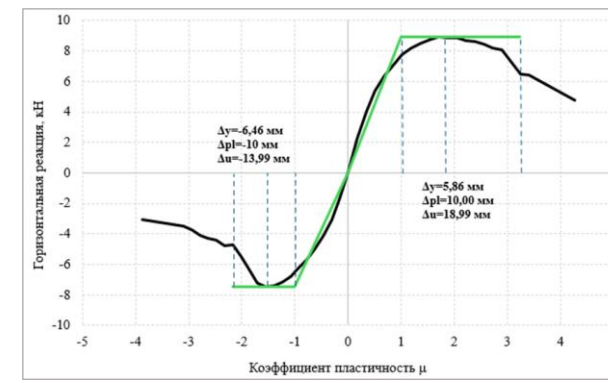
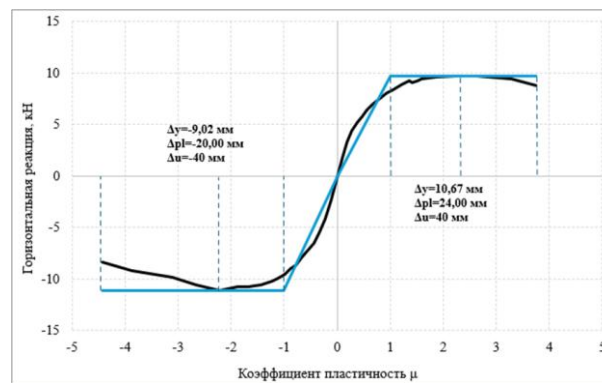
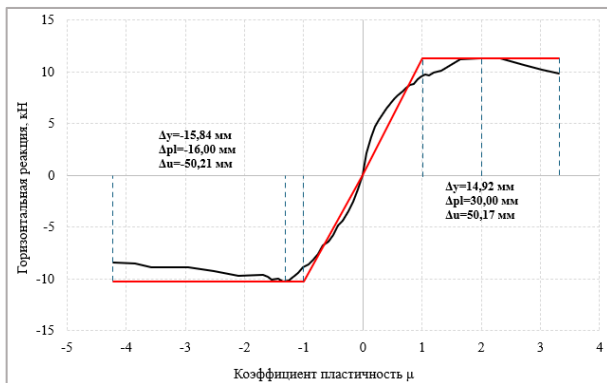
Аппроксимация огибающей гистерезиса

$$A_1 = A_2 \quad \mu = \frac{\Delta_{pl}}{\Delta_y}$$

| № п.п. | Маркировка образцов | Δ_y , перемещения (мм) | Δ_{pl} , перемещения (мм) | Δ_u , перемещения (мм) | H_y , горизонтальная реакция (кН) | H_{pl} , горизонтальная реакция (кН) | H_u , горизонтальная реакция (кН) | K_y , секущая жесткость (кН/м) |
|--------|---------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|--|---|---|
| 1 | Ц-0,3-0 | 14,92 -15,84 | 30,00 -16,00 | 50,17 -50,21 | 9,56 -10,22 | 11,32 -10,21 | 9,83 -8,42 | 0,64 -0,65 |
| 2 | Ц-0,6-0 | 10,67 -9,02 | 24,00 -20,00 | 40,00 -40,00 | 8,15 -9,53 | 9,75 -11,09 | 8,77 -8,35 | 0,76 -1,06 |
| 3 | Цс-I-0,3-15 | 5,86 -6,64 | 10,00 -10,00 | 18,99 -13,99 | 7,76 -6,55 | 8,91 -7,48 | 6,48 -4,74 | 1,32 -0,99 |
| 4 | Цс-II-0,3-15 | 7,19 -7,08 | 12,03 -10,01 | 25,02 -24,08 | 7,32 -7,90 | 8,56 -9,30 | 5,81 -6,79 | 1,02 -1,12 |
| 5 | Цс-I-0,3-30 | 4,38 -5,96 | 10,00 -10,03 | 30,00 -33,05 | 3,15 -7,26 | 3,54 -8,54 | 2,72 -7,35 | 0,72 -1,22 |
| 6 | Цс-II-0,3-30 | 6,07 -7,11 | 10,98 -12,05 | 29,99 -35,00 | 5,23 -7,54 | 6,06 -8,83 | 3,46 -8,49 | 0,86 -1,06 |
| 7 | Цс-I-0,6-15 | 4,38 -5,96 | 9,99 -11,06 | 16,99 -17,00 | 5,02 -6,06 | 7,25 -8,11 | 4,09 -6,49 | 1,15 -1,02 |
| 8 | Цс-I-0,6-30 | 4,26 -2,87 | 7,02 -4,00 | 12,59 -6,00 | 6,25 -4,17 | 7,06 -4,31 | 6,09 -3,89 | 1,47 -1,45 |
| 9 | Цс-II-0,6-30 | 6,6 -6,53 | 10,07 -11,23 | 16,99 -18,02 | 5,63 -6,58 | 6,43 -7,33 | 4,58 -5,71 | 0,85 -1,01 |



Сравнение
результатов:
а) горизонтальные
перемещения;
б) горизонтальная
реакция



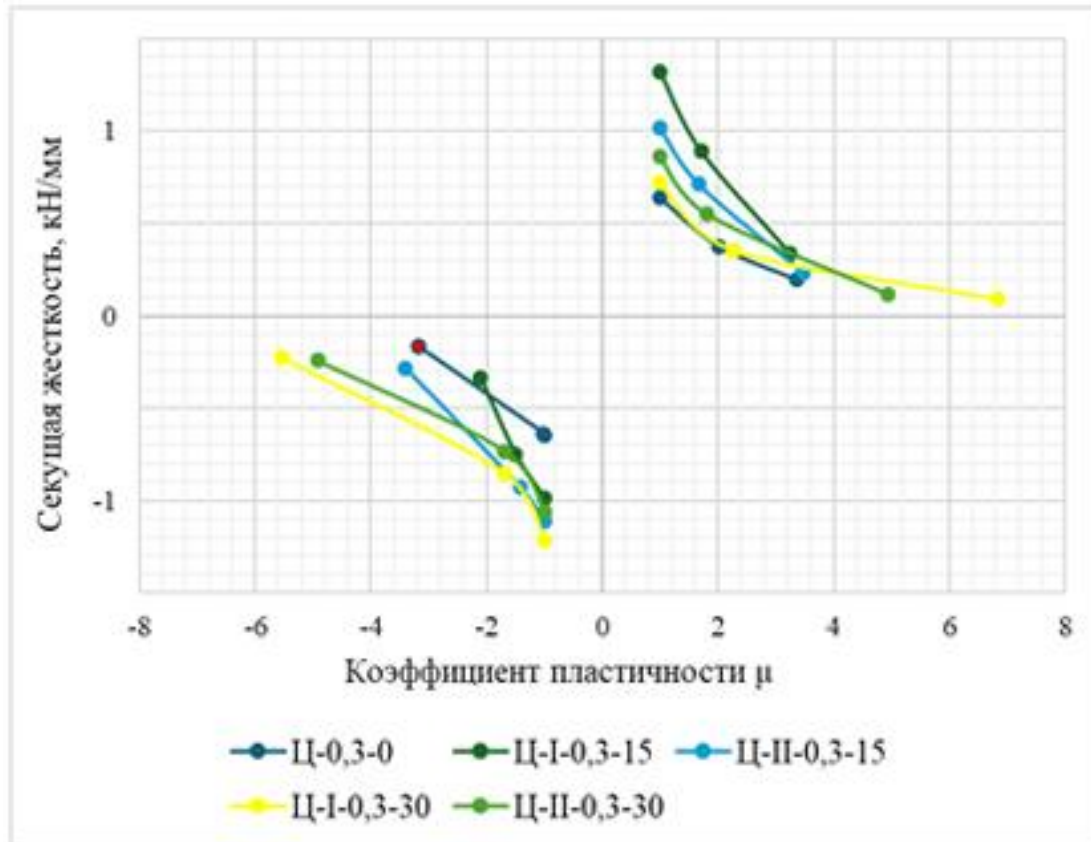
Экспериментальный
гистерезис колонн:

- а) Ц-0,3-0;
- б) Ц-0,6-0;
- в) Цс-I-0,3-15;
- г) Цс-II-0,3-15;
- д) Цс-I-0,3-30;
- е) Цс-II-0,3-30;
- ж) Цс-I-0,6-30;
- з) Цс-II-0,6-30;
- и) Цс-I-0,6-15.

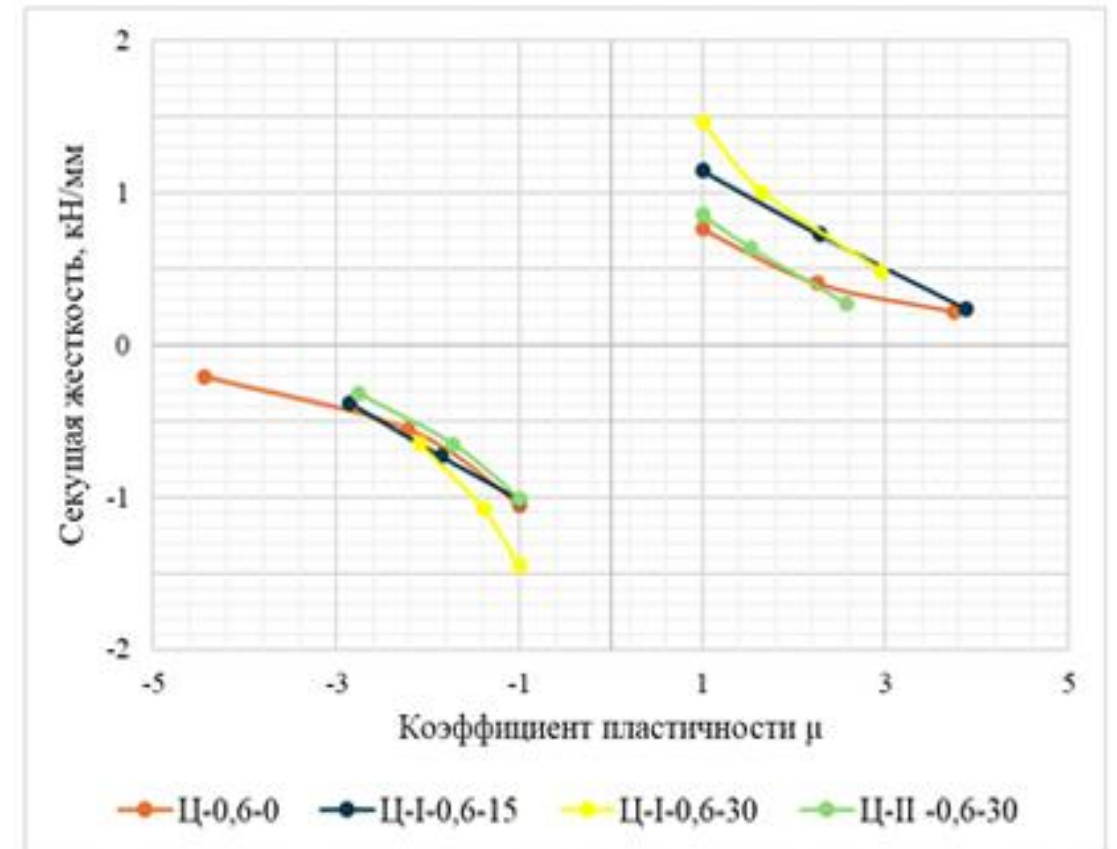
$$K_y = \frac{H_y}{\Delta_y}$$

H_y – горизонтальное усилие при $\mu=1$;

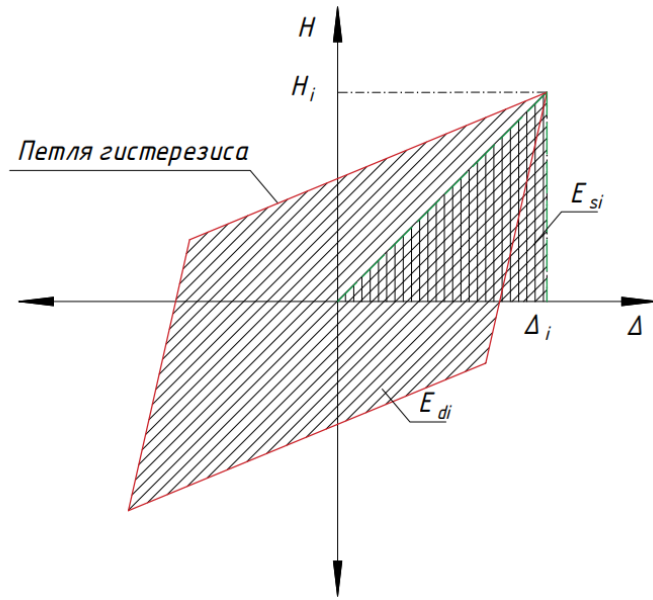
Δ_y – горизонтальное перемещение при $\mu=1$.



Секунная жесткость при уровне нагрузки 0,3



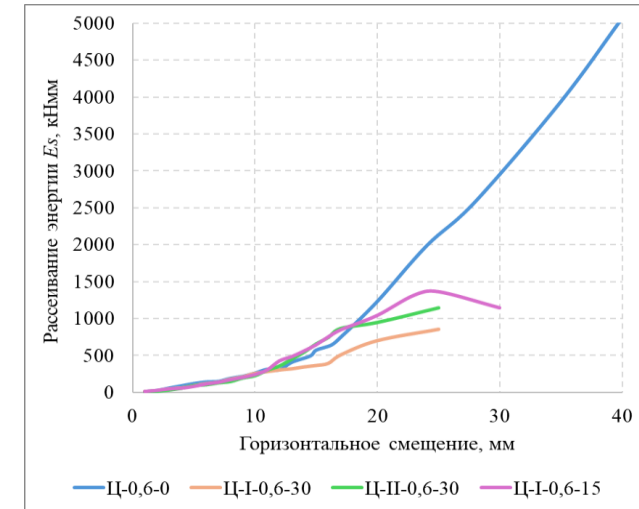
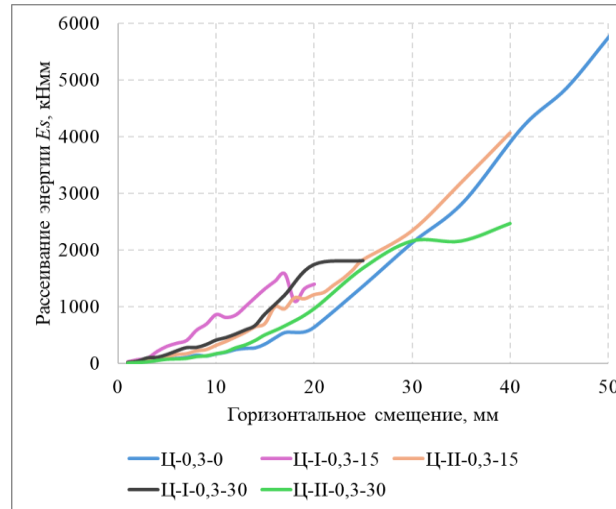
Секунная жесткость при уровне нагрузки 0,6



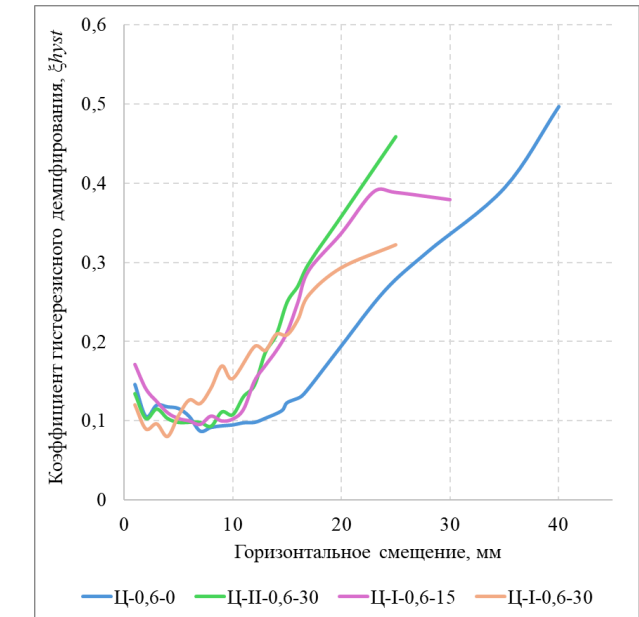
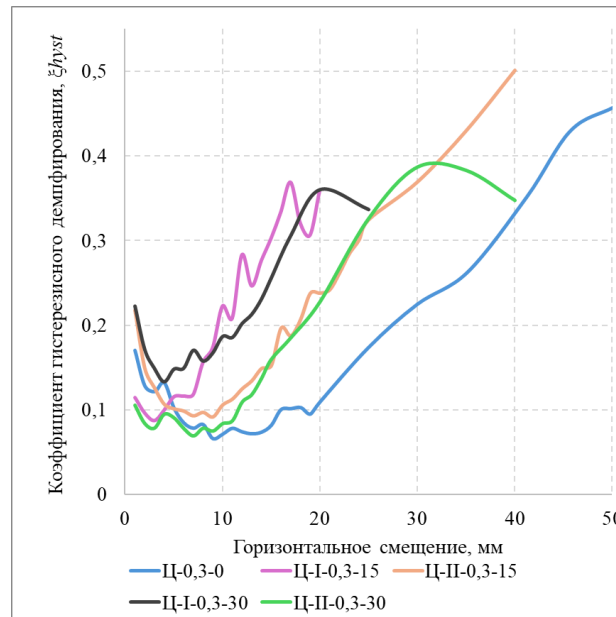
Определение энергии при гистерезисном деформировании

$$\xi_{hyst,i} = \frac{E_{di}}{2\pi E_{si}}$$

E_{di} - площадь петли гистерезиса (полная работа);
 E_{si} - упругая работа за четверть цикла деформирования.



Рассеивание энергии при уровне нагружения 0,3 и 0,6 от разрушающей нагрузки



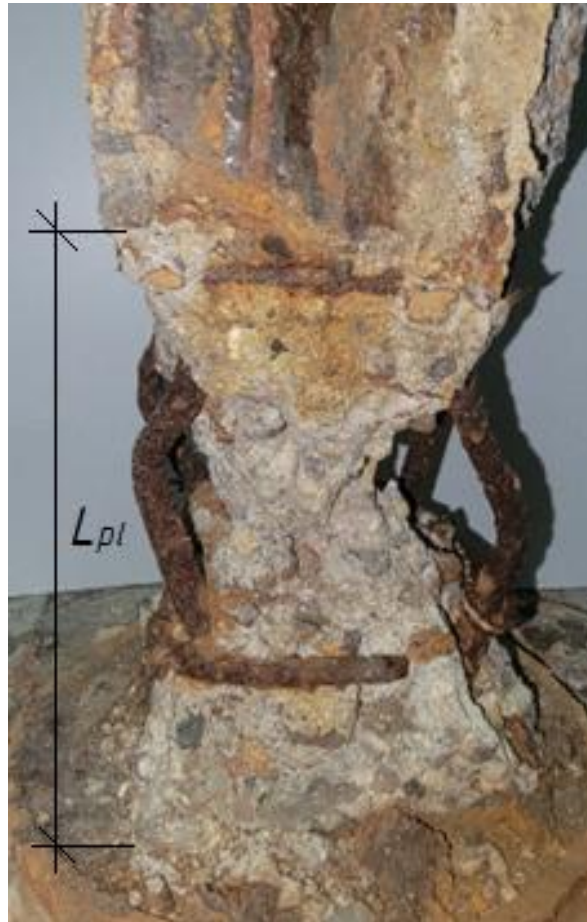
Гистерезисное демпфирование при уровне 0,3 и 0,6 от разрушающей нагрузки

Определение зоны разрушения

| Маркировка колонн | L_{pl} , см |
|-------------------|---------------|
| Ц-0,3-0 | 5-9 |
| Ц-0,6-0 | 7-12 |
| Цс-I-0,3-15 | 15-17 |
| Цс-II-0,3-15 | 7-12 |
| Цс-I-0,3-30 | 15-19 |
| Цс-II-0,3-30 | 13-15 |
| Цс-I-0,6-15 | 12-16 |
| Цс-II-0,6-30 | 10-14 |
| Цс-II-0,6-30 | 15-19 |
| Цс-I-0,3-15 | 11-17 |

Длина пластического шарнира:

- неповрежденные колонны $(0,5-1)h$;
- поврежденные арматуры до 15% $(1-1,5)h$;
- поврежденные арматуры до 30% $(1,5-2)h$.

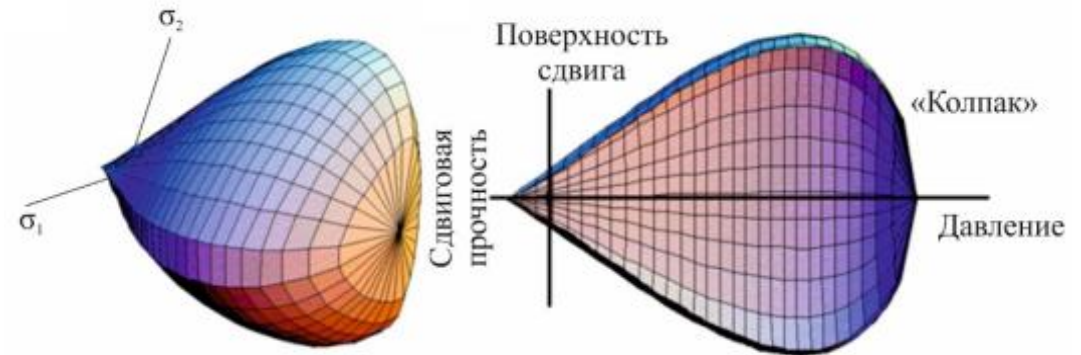


Характер разрушения колонн при малоцикловом нагружении без коррозии и с коррозией арматуры

Цель численного исследования: верифицировать работу сжатых железобетонных образцов колонн при возрастающем малоцикловом знакопеременном воздействии и сравнить с экспериментальными данными.

Задачи численного исследования:

- Оценить напряженно-деформированное состояние колонны в области возникновения максимального момента при знакопеременных нагрузках;
- Оценить влияние коррозии арматуры на несущую способность сжатых колонн при возрастающем малоцикловом знакопеременном воздействии;
- Сравнить результаты численных исследований и экспериментальных данных;
- Сравнить характер деформирования и повреждений колонны при знакопеременном нагружении.



Модель материала Continuous Surface Cap Model (CSCM)
(шатровая модель с непрерывной поверхностью)

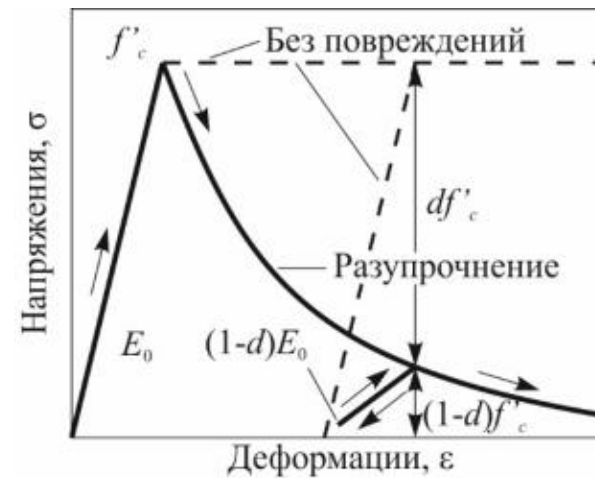


Диаграмма «Напряжения-деформации»

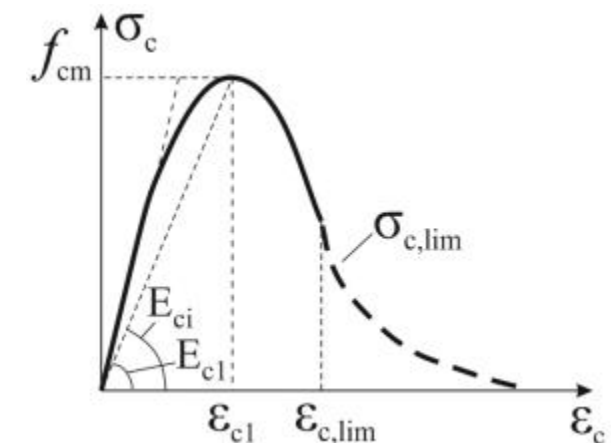
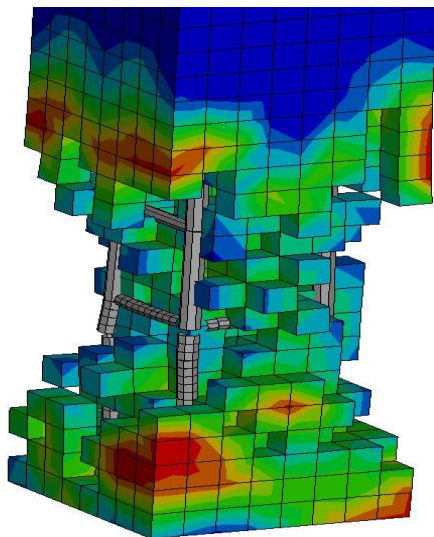
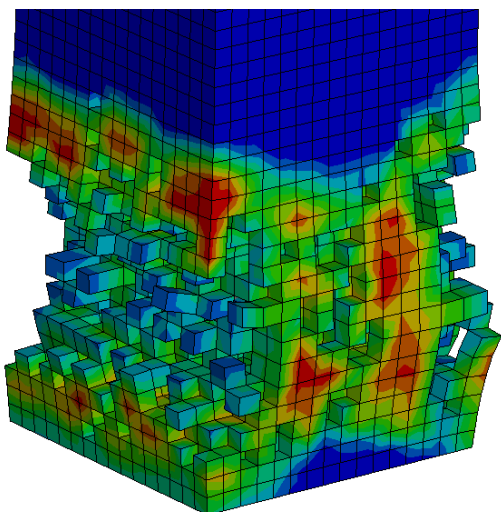


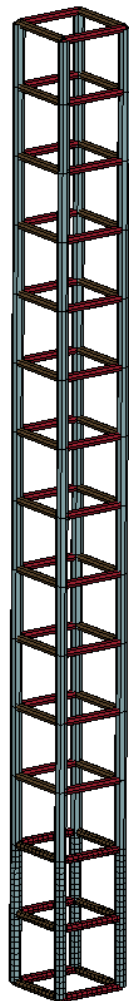
Диаграмма работы бетона на сжатие



а)



б)



Арматурный
каркас колонны

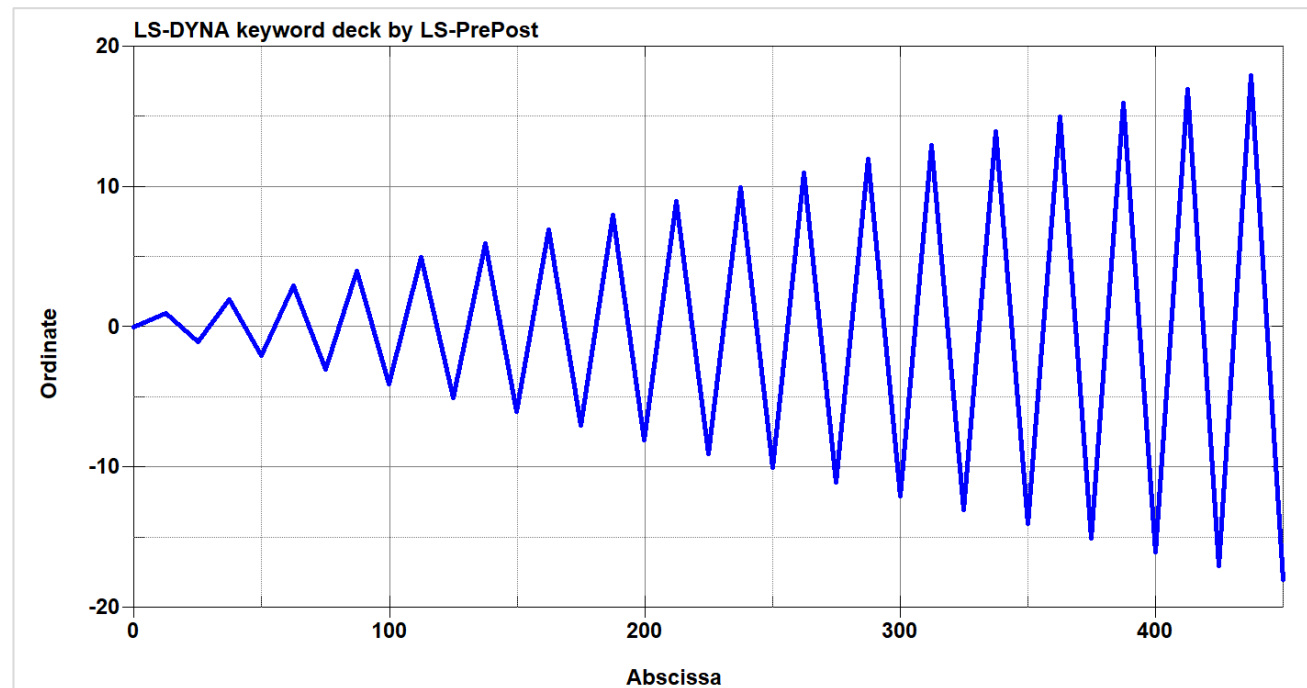
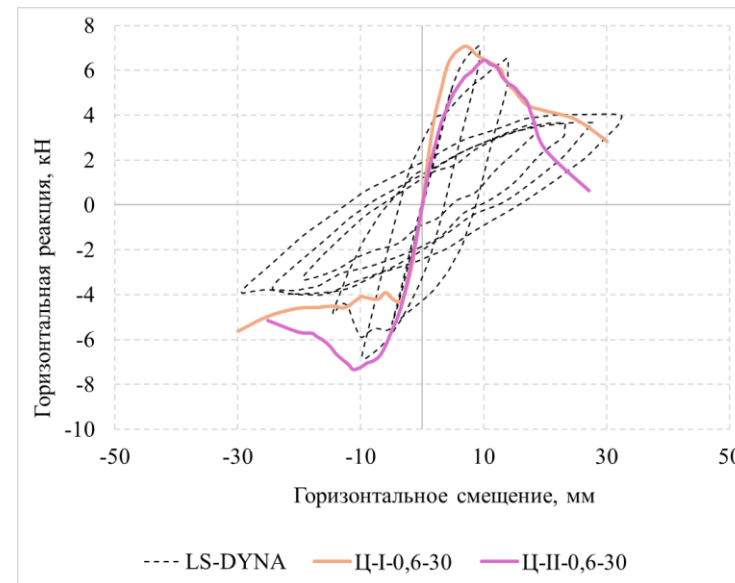
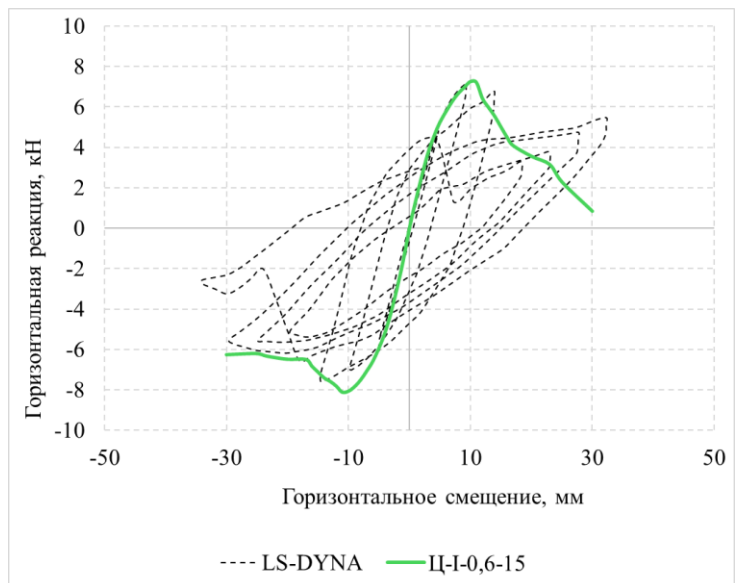
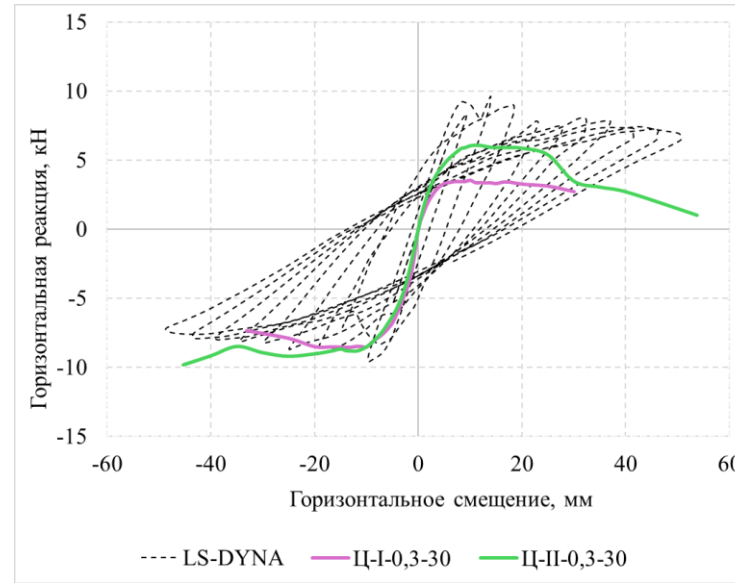
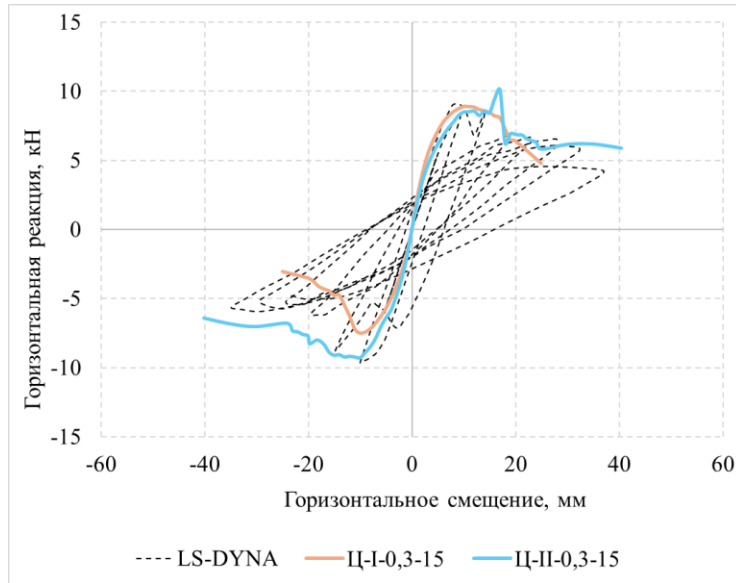


Диаграмма смещения конца колонны

Используемые модели материалов в ПК LS-DYNA:

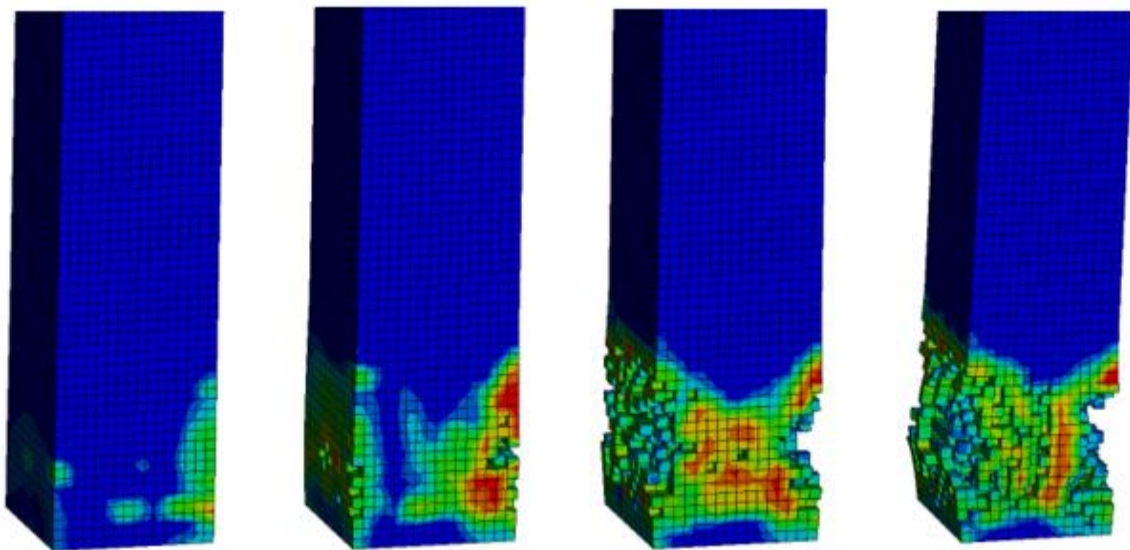
- Продольная и поперечная арматура: Piecewise linear plasticity (title 024)
- Модель бетона: CSCM concrete (title 159)
- Учет сцепления арматуры с бетоном: Constrained Lagrange In Solid



в)

Численный гистерезис
КОЛОНН:

- а) Серия Ц-I(II)-0,3-15;
- б) Серия Ц-I(II)- 0,6-15;
- в) Серия Ц-I(II)- 0,3-30;
- г) Серия Ц-I(II)- 0,6-30.



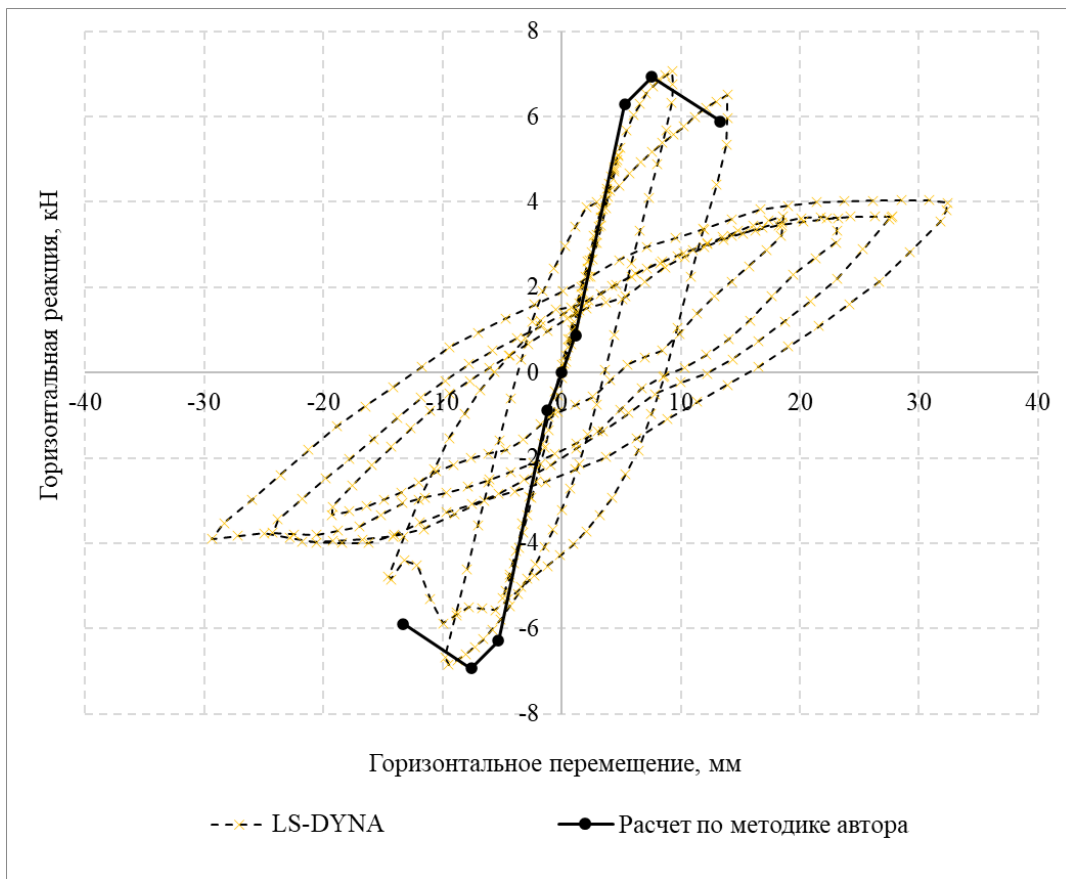
Стадии разрушения колонн в ПК LS-DYNA



Характер разрушения колонн в ПК LS-DYNA и экспериментальных образцов

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных

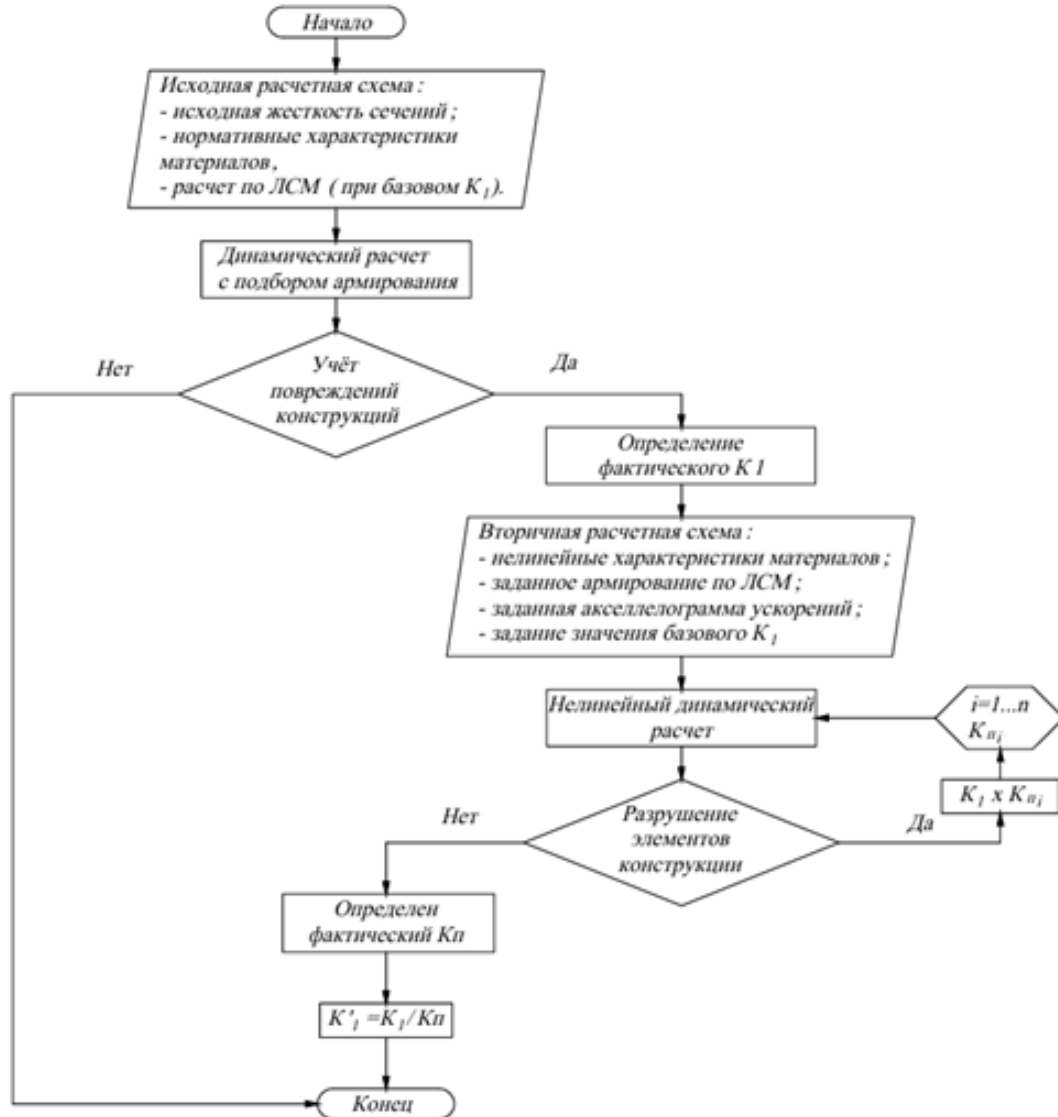
| № п.п. | Маркировка образцов | $\pm\Delta_y$, перемещения (мм) | $\pm\Delta_{pl}$, перемещения (мм) | $\pm N_y$, горизонтальная реакция (кН) | $\pm N_{pl}$, горизонтальная реакция (кН) |
|--------------|---------------------|--|---|---|--|
| 1 | Ц-I-0,3-15 | 5,86 -6,64 | 10,00 -10,00 | 7,76 -6,55 | 8,91 -7,48 |
| 2 | Ц-II-0,3-15 | 7,19 -7,08 | 12,03 -10,01 | 7,32 -7,90 | 8,56 -9,30 |
| 3 | LS-DYNA | 5,17 -5,24 | 8,55 -9,97 | 6,91 -8,05 | 9,11 -9,65 |
| Сравнение, % | | -24,64 -23,62 | -14,54 -0,35 | -4,36 11,42 | 8,58 15,02 |
| 4 | Ц-I-0,3-30 | 4,38 -5,96 | 10,00 -10,03 | 3,15 -7,26 | 3,54 -8,54 |
| 5 | Ц-II-0,3-30 | 6,07 -7,11 | 10,98 -12,05 | 5,23 -7,54 | 6,06 -8,83 |
| 6 | LS-DYNA | 5,19 -5,21 | 8,97 -9,49 | 6,36 -7,19 | 9,61 -9,59 |
| Сравнение, % | | -20,58 -20,28 | -18,75 -14,04 | -14,05 -2,84 | 10,65 10,42 |
| 4 | Ц-I-0,6-15 | 4,38 -5,96 | 9,99 -11,06 | 5,02 -6,06 | 7,25 -8,11 |
| 8 | LS-DYNA | 5,61 -5,57 | 9,33 -14,53 | 5,57 -4,45 | 7,18 -7,62 |
| Сравнение, % | | 28,08 -6,54 | -6,61 31,37 | 10,96 -26,57 | -0,97 -6,04 |
| 9 | Ц-II-0,6-30 | 6,6 -6,53 | 10,07 -11,23 | 5,63 -6,58 | 6,43 -7,33 |
| 10 | Ц-I-0,6-30 | 4,26 -2,87 | 7,02 -4,00 | 6,25 -4,17 | 7,06 -4,31 |
| 11 | LS-DYNA | 5,24 -5,48 | 7,07 -6,85 | 4,92 -4,48 | 7,06 -6,85 |
| Сравнение, % | | 11,49 16,60 | -7,16 -10,05 | -8,47 -16,65 | 21,31 17,70 |



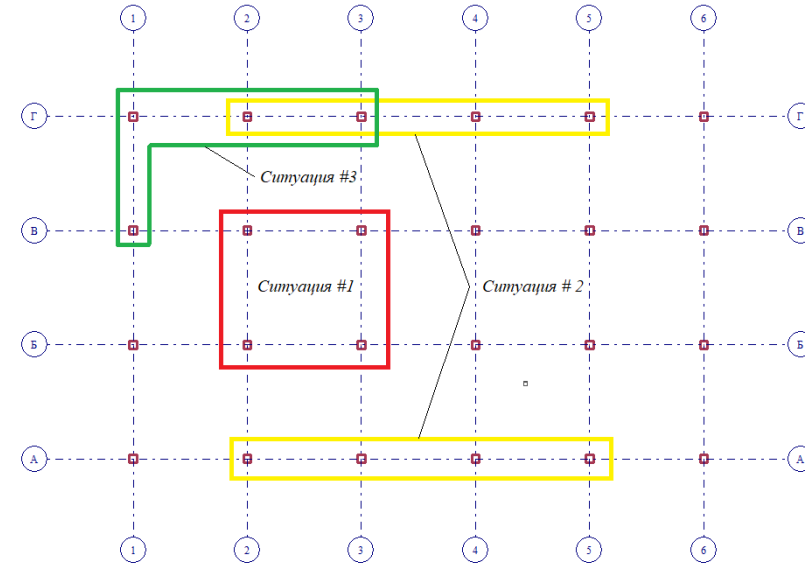
Сравнение результатов численного моделирования и расчётов

| № п.п. | Наименование | $\pm\Delta_y$, перемещения (мм) | $\pm\Delta_{pl}$, перемещения (мм) | $\pm H_y$, горизонтальная реакция (кН) | $\pm H_{pl}$, горизонтальная реакция (кН) |
|--------------|------------------------------|--|---|---|--|
| 1 | Расчет по методике автора | 5,35 | 7,57 | 6,29 | 6,93 |
| | | -5,32 | -7,57 | -6,29 | -6,93 |
| 2 | LS-DYNA | 5,24 | 7,07 | 4,92 | 7,06 |
| | | -5,48 | -6,85 | -4,48 | -6,85 |
| Сравнение, % | | 1,50 | 6,66 | 21,78 | -1,88 |
| | | -3,01 | 9,56 | 28,78 | 1,15 |

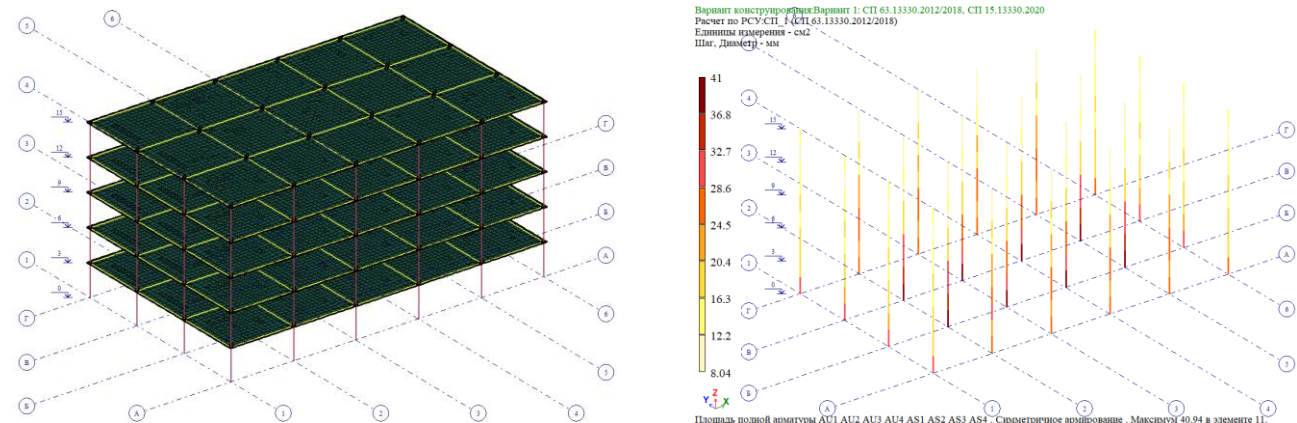
Диаграмма «Горизонтальная реакция, кН – перемещение, мм»



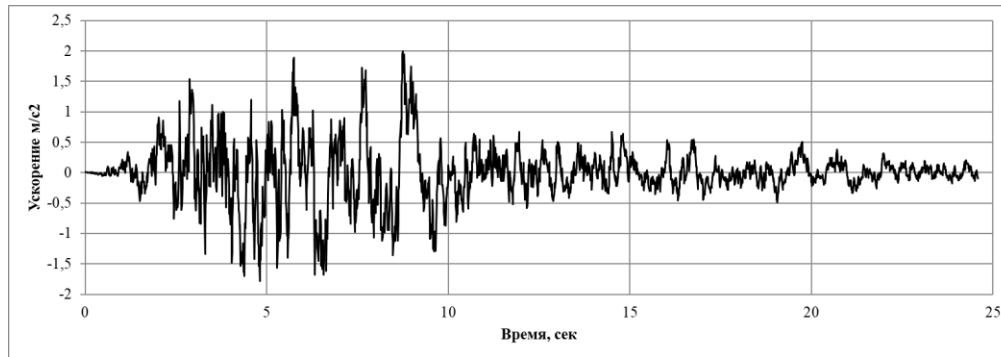
Блок-схема



Рассматриваемые расчетные ситуации



Расчетная схема «ЛИРА-САПР»

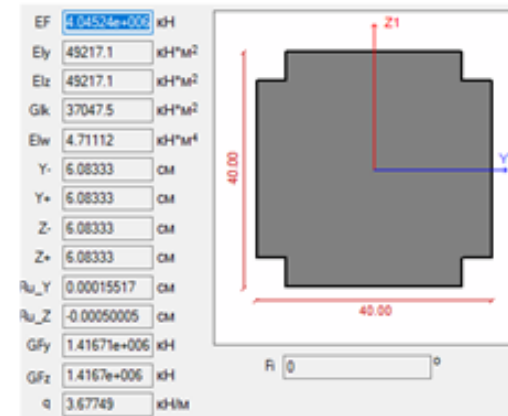


Расчетная акселерограмма ускорения

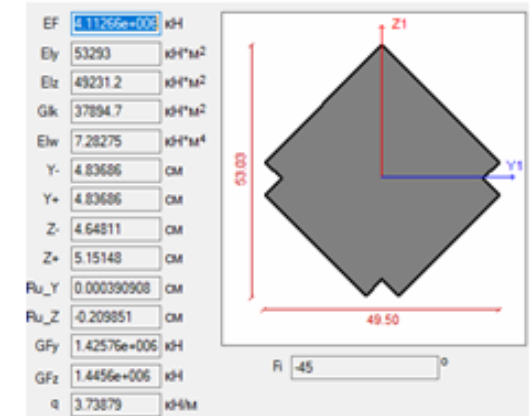
$$K_1' = \frac{K_1}{K_0 K_\psi K_\Pi}$$

| № п.п. | Расчетная ситуация | Период T, сек | K_Π | K_1' | $\frac{K_1'}{K_1}$ |
|--------|--------------------|---------------|---------|--------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6* |
| 1 | Базовая схема | 0,832 | 0,791 | 0,34 | $\frac{0,97}{1,0}$ |
| 2 | №1 | 0,837 | 0,714 | 0,38 | $\frac{1,09}{1,12}$ |
| 3 | №2 | 0,837 | 0,769 | 0,35 | $\frac{1,0}{1,03}$ |
| 4 | №3 | 0,835 | 0,734 | 0,367 | $\frac{1,05}{1,08}$ |

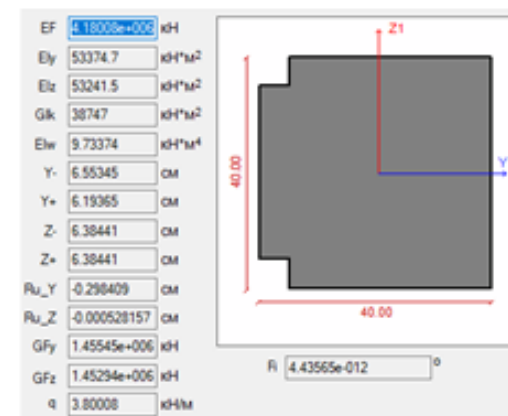
*Примечание: в столбце 6 в числителе указано отношение определенного коэффициента допускаемых повреждений к базовому 0,35; в знаменателе указано отношение определенного коэффициента допускаемых повреждений к K_1' базовой схемы.



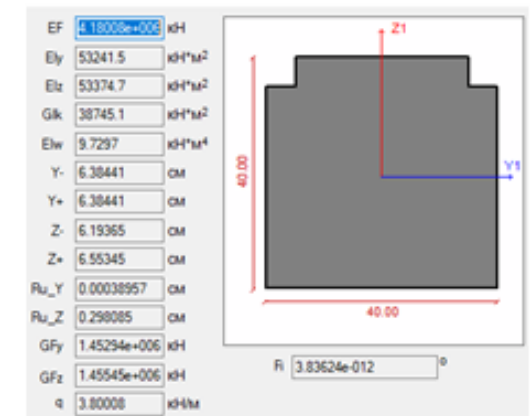
а)



б)



в)



г)

Расчетный контур сечения поврежденных коррозией колонн:

- а) повреждения по периметру;
- б) повреждение по двум сторонам;
- в, г) повреждение по одной стороне

На основании проведенных экспериментальных, теоретических и численных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При проведении анализа теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов, установлено, что проблема оценки НДС железобетонных элементов с коррозионными повреждениями является актуальной и малоизученной.
2. На основе экспериментальных исследований железобетонных колонн была выполнена количественная оценка изменения таких параметров, как: несущая способность при знакопеременном нагружении; изменение начальной жесткости колонны; пластичность колонн; диссипативные параметры при гистерезисном деформировании колонны. Полученные опытные данные позволяют оценить изменение вышеописанных параметров при сравнении с эталонными образцами и прогнозировать поведение конструкции при коррозионных повреждениях арматуры.
3. Выполнено сравнение изменений основных динамических параметров железобетонных образцов колонн до и после коррозии арматуры. Установлено значительное снижение первой собственной частоты до 30% и увеличение периода колебаний. Также отмечено, что степень коррозионного повреждения при уровнях коррозии в 15% и 30% незначительно повлияли на измеренные показатели динамических характеристик колонн между сериями.
4. Вследствие коррозии арматуры было отмечено изменение её прочностных и деформационных характеристик. Заметно снижены предел текучести и предел прочности арматуры на 6% и 11% соответственно. Также выявлена значительная деградация пластичности арматуры и появление эффекта охрупчивания. Из-за снижения пластичности коррозионно-поврежденной арматуры до 68% возможен случай хрупкого разрушения железобетонных элементов при действии сейсмических нагрузок вследствие невозможности необходимого пластического деформирования арматурной стали за пределами площадки текучести.
5. Была представлена аналитическая методика расчета огибающей кривой гистерезиса железобетонных колонн, описывающая несущую способность коррозионно-поврежденной железобетонной колонны при действии вертикальной и горизонтальной силы. На основании анализа проведенных экспериментальных исследований была уточнена методика расчета и определены зависимости к уточнению параметров огибающей гистерезиса. По результатам сравнения аналитического расчета и экспериментальных данных погрешность аналитического расчета при определении момента в нормальном сечении составила не более 5% и деформативность не более 18%, что указывает на достоверность предложенного метода расчета.
6. Выполнено сравнение результатов, полученных экспериментально и на основе численного моделирования в программном комплексе LS-DYNA. Погрешность численной модели при сопоставлении с экспериментальными данными при определении горизонтальной реакции составляет от 1 до 27% и горизонтальной деформации от 7 до 28%. Сравнение результатов эксперимента с результатами расчета позволяет сделать вывод о корректности предложенного метода расчета коррозионно-поврежденных колонн при действии горизонтальных знакопеременных нагрузок, моделирующих сейсмическое воздействие.
7. При оценке сейсмостойкости железобетонного каркаса, подверженного коррозионным повреждениям арматуры, наблюдается увеличение коэффициента допускаемых повреждений. Рекомендуется выполнять оценку сейсмостойкости железобетонных зданий с дефектами арматуры по предлагаемой методике с учётом изменения расчетного поперечного сечения колонны, уменьшения диаметра арматуры и снижения прочностных характеристик стали для уточнения коэффициента K_1 .

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!