



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

СПЕЦИФИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ В АВАРИЙНОЙ РАСЧЕТНОЙ СИТУАЦИИ

Докладчики

Савин Сергей Юрьевич

К.т.н., доцент, НИУ МГСУ

Информация о грантовой поддержке исследований



Российский
научный
фонд



Грант Российского научного фонда № 24-49-10010

«Моделирование энергетических и силовых процессов в конструктивных системах зданий и сооружений»

Научный коллектив от Российской Федерации:

Савин С.Ю., Колчунов В.И., Ву Н.Т., Кореньков П.А., Ильющенко Т.А., Московцева В.С., Амелина М.А., Кайдас П.А.

Научный коллектив от Республики Беларусь:

Воробей А.П., Белкина И.В., Беломесова К.Ю., Лизогуб А.А.

Российско-Белорусский научный проект направлен на решение проблемы обеспечения живучести железобетонных несущих систем зданий и сооружений в особых расчетных ситуациях с учетом нормируемых величин допустимых рисков при явном оценивании мер надёжности и неявном моделировании в рамках метода частных коэффициентов.

Аварийные воздействия на конструкции зданий и сооружений

Воздействия на несущие элементы, приводящие к их разрушению

Взрывы:
(а) внешние
(б) внутренние

Механические столкновения

Накопление средовых повреждений:
(а) быстрое
(б) длительное

Ошибки проектирования и строительства, нарушения при эксплуатации

Комбинированные воздействия



Обрушение части здания Champlain Towers South (Флорида, США, 2021) вследствие накопления коррозионных повреждений



Обрушение части здания Рана Плаза (Савар, Бангладеш, 2013) из-за нарушений при строительстве и эксплуатации



Обрушение здания торгового центра Sampoong (Сеул, Корея, 1995) вследствие ошибок проектирования и нарушений при эксплуатации



Обрушение здания «Трансвааль парк» (Москва, Россия, 2004) вследствие ошибок проектирования

Классификация особых (аварийных) расчетных ситуаций и стратегии проектирования



Форматы безопасности конструктивных систем сооружений



Методы проектирования для предотвращения прогрессирующего обрушения

Нормативный документ	Анализ риска (Risk-Based)	Ключевые элементы (key element)	Устройство связей (Tie force)	Альтернативные пути передачи нагрузок (ALP)
EN 1991-1-7	✓	✓	✓	✓
UFC 4-023-03	~	✓	✓	✓
GSA 2016	~	✗	✗	✓
ASCE 76-23	✓	~	~	✓
СП 385	~	✗	~	✓

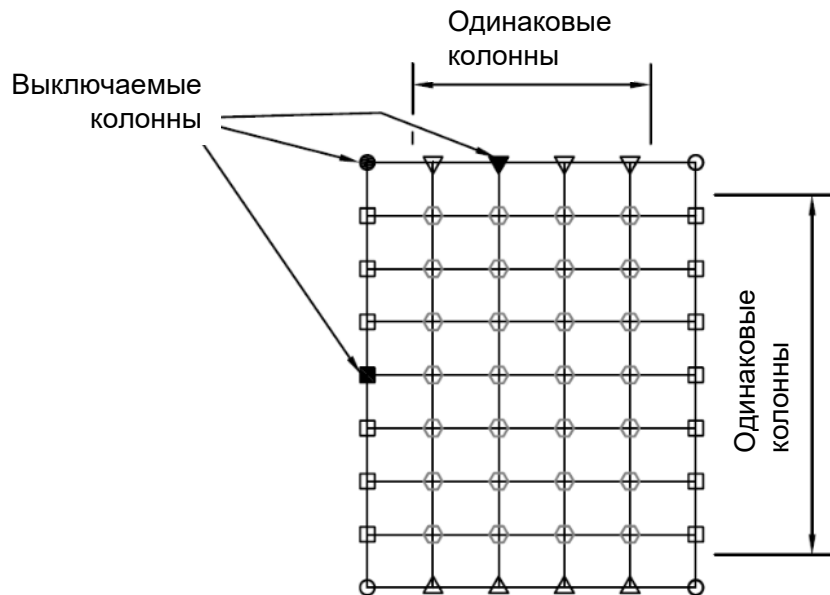
Алгоритм расчета устойчивости к прогрессирующему обрушению



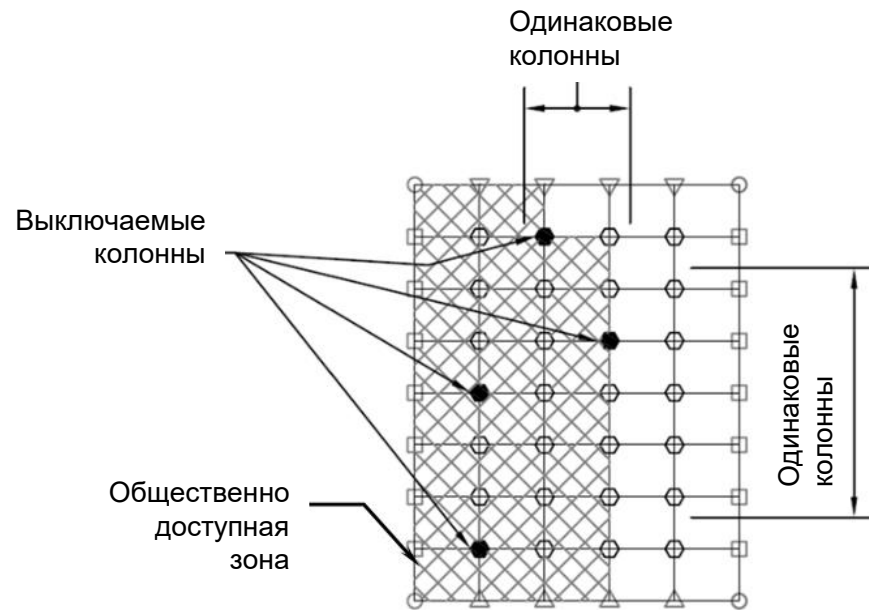
Уровни повреждений / разрушений по ASCE 76-23

Независимые от вида угрозы сценарии повреждений (Hazard Independent Damage Scenarios - HIDS)	Размеры зоны локального разрушения
HIDS H-1 должны учитываться во всех местах по всему зданию. Не допускается разрушение главных несущих компонентов в результате реализации сценариев H-1. Разрушение второстепенных несущих компонентов должно быть ограничено отдельными элементами, непосредственно примыкающими к объему повреждения H-1.	4 × 4 × 4 дюйма (10 × 10 × 10 см)
HIDS H-2 должны учитываться во всех местах по всему зданию. Не допускается разрушение несущих компонентов в результате реализации сценариев H-2.	2 × 2 × 2 фута (60 × 60 × 60 см)
HIDS H-3 должны учитываться на всех главных элементах по всему зданию. Допускается частичное обрушение в результате реализации H-3, степень разрушения в результате сценария H-3 должна быть ограничена областью влияния AI-3.	4 × 4 × 4 фута (60 × 60 × 60 см) Для стеновых конструкций – на всю толщину стены на площади 144 кв. фута (13.4 кв.м)
HIDS H-4 должны учитываться по всем периметрам или на публично доступных главных элементах по всему зданию. Допускается частичное обрушение в результате реализации сценария H-4, но степень разрушения должна быть ограничена удвоенной областью влияния AI-4	4 x 8 x 20 футов (1.22 м x 2.44 м x 6.1 м) Для стеновых конструкций – на всю толщину стены на площади 288 кв. фута (≈ 26.8 кв.м)

Назначение начального локального разрушения



Варианты выключения колонн крайних рядов и угловых колонн

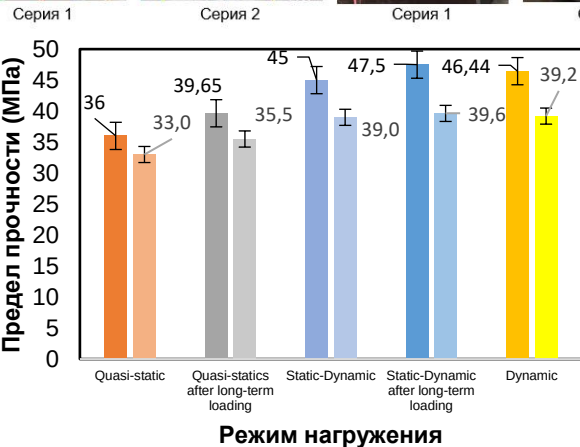


Варианты выключения колонн средних рядов

Учет пластических и вязкостных свойств материалов при динамическом нагружении с учетом длительности эксплуатации

а) квазистатические испытания без учета

б) динамические испытания

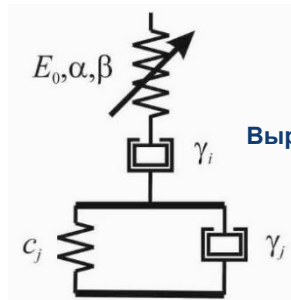


Выражение вязкоупругой модели наследственного старения:

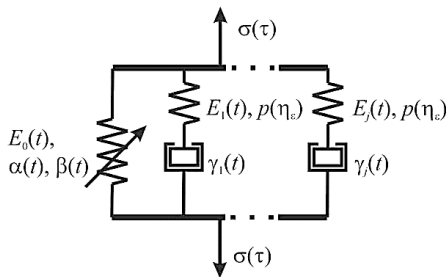
$$\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma(t_1)}{E_{ci}(t_1)} + \int_{\tau_0}^{t_1} \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau;$$

Выражение обобщенной модели Максвелла:

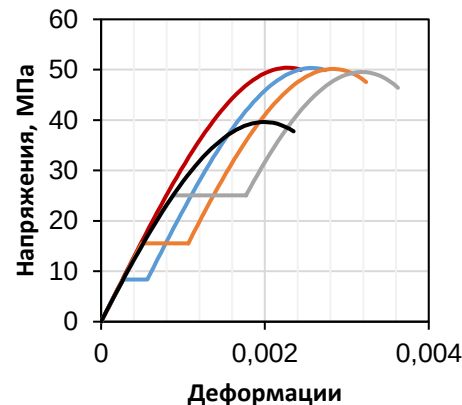
$$\sigma(\varepsilon, t) = f_0(\varepsilon) + \int_{t_1}^t \dot{\varepsilon}(\tau) \cdot p(\eta_\varepsilon) \cdot \sum_{j=1}^m d_j(t) \cdot e^{-\gamma_j(t)(t-\tau)} d\tau.$$



ВУМНС

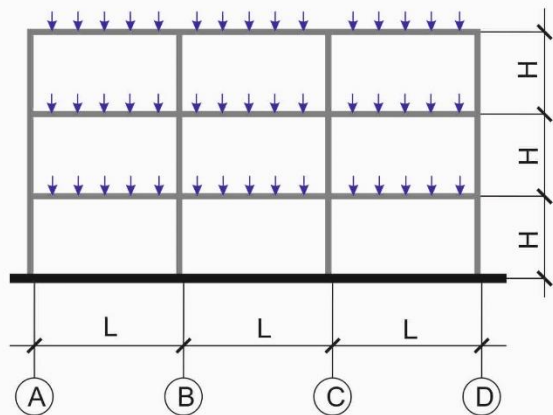


Обобщенная модель Максвелла

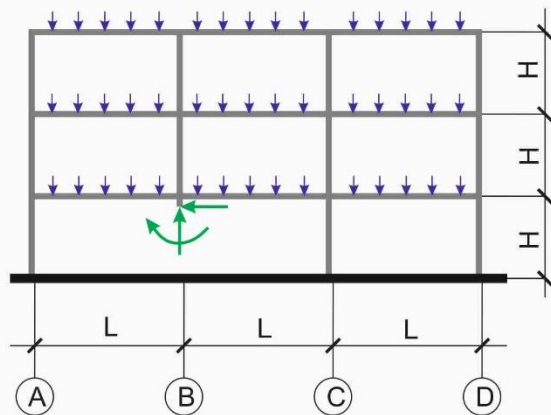


Диаграммы состояния при статико-динамическом нагружении с учетом длительности статического этапа

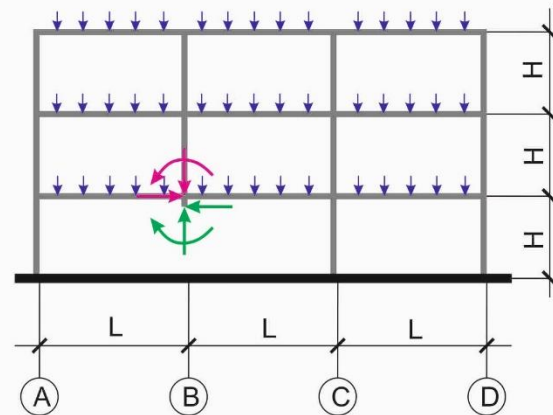
Нелинейный динамический расчет сооружений на аварийную ситуацию: предпосылки



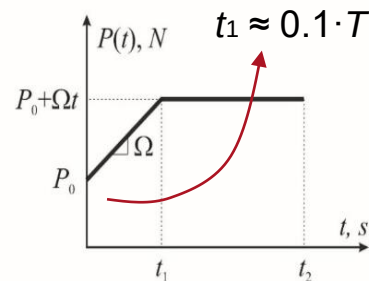
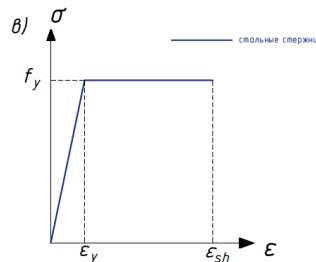
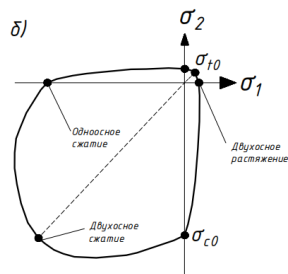
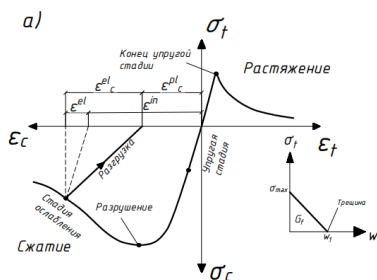
Первичная расчетная схема



Эквивалентная первичная расчетная схема



Вторичная расчетная схема



Моделирование без назначения времени релаксации реакции «удаляемого» элемента/связи

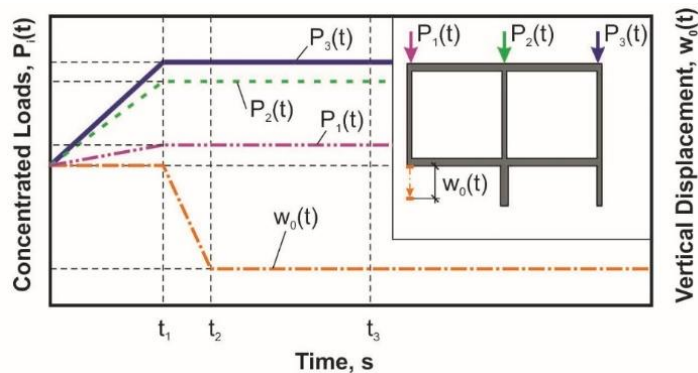
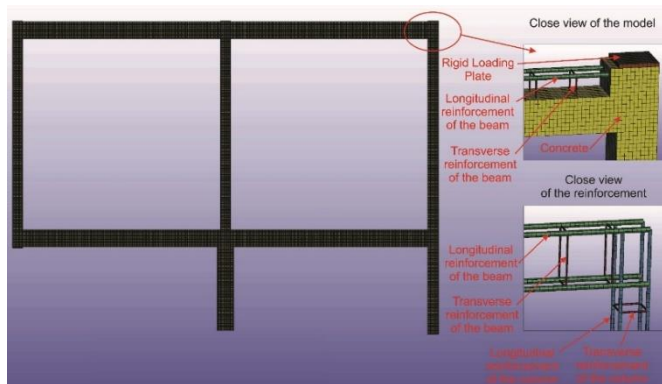
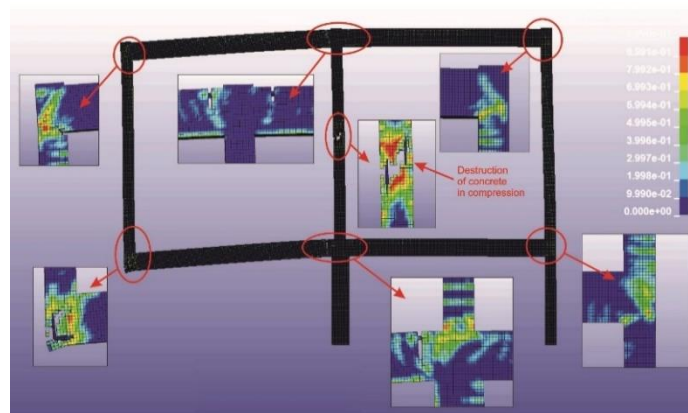


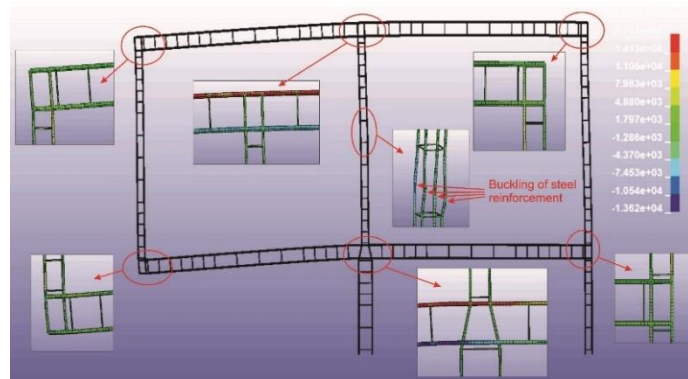
Диаграмма деформационного нагружения



Общий вид конечно-элементной модели рамы



Общий вид модели в момент разрушения



Усилия в арматурном каркасе рамы в момент разрушения

Нелинейный квазистатический метод

Push-down

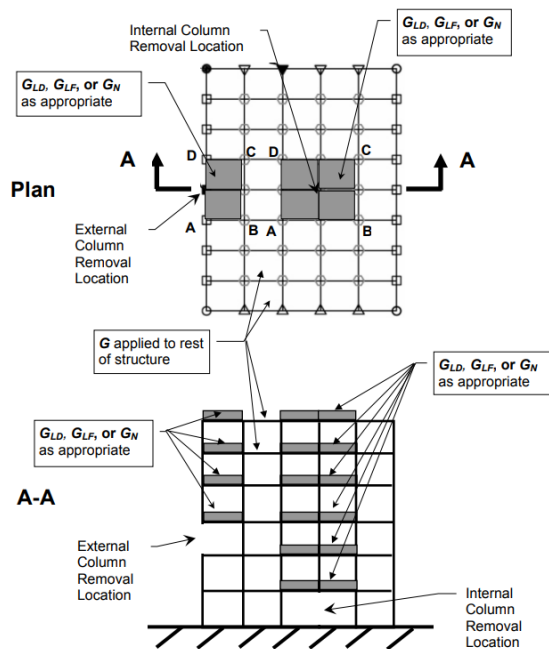
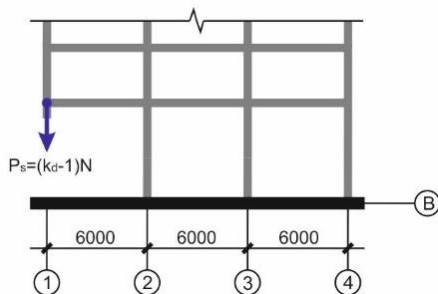


Table 3-5. Dynamic Increase Factors for Nonlinear Static Analysis

Material	Structure Type	Ω_N
Steel	Framed	$1.08 + 0.76/(\theta_{pr}/\theta_y + 0.83)$
	Load-Bearing Wall	2
Reinforced Concrete	Framed	$1.04 + 0.45/(\theta_{pr}/\theta_y + 0.48)$
	Load-Bearing Wall	2

Pull-down



Нагрузка, прикладываемая по месту удаляемого из расчетной схемы элемента/связи:

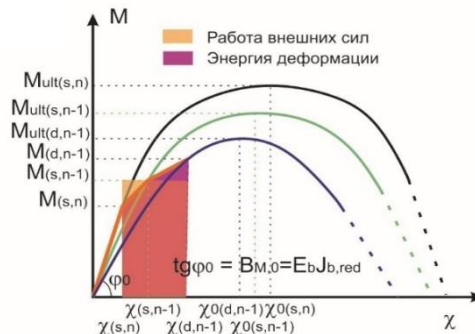
$$P_s = (k_d - 1) \cdot N.$$

Определение обобщенного усилия по месту отбрасываемой связи (несущего элемента) на энергетической основе:

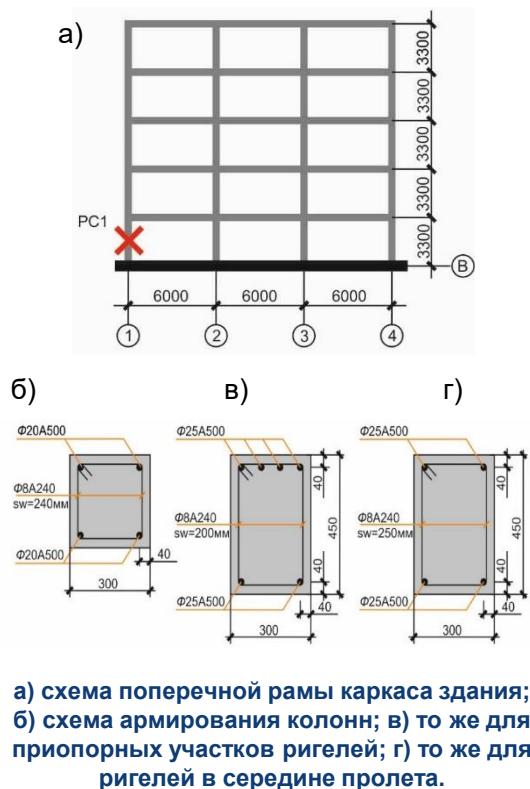
$$\Phi(\varepsilon_{n-1}^d) - \Phi(\varepsilon_n^s) = \sigma_{n-1}^s (\varepsilon_{n-1}^d - \varepsilon_n^s),$$

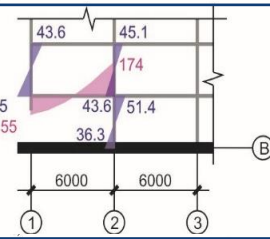
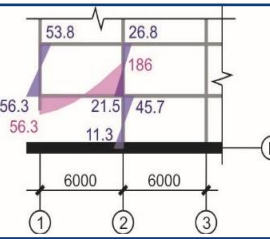
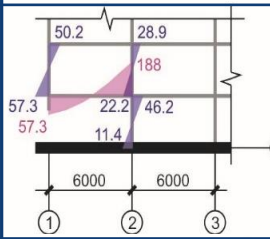
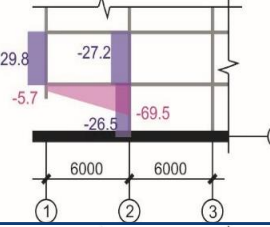
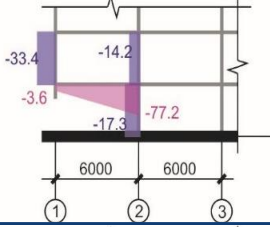
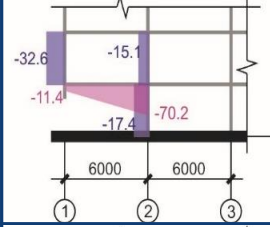
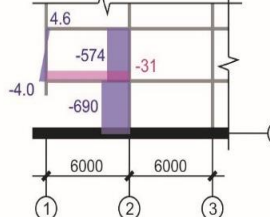
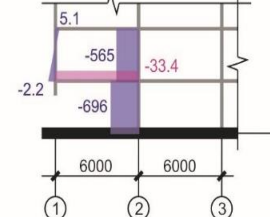
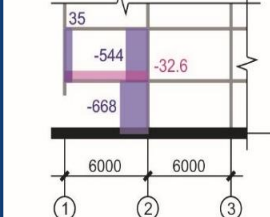
$$\sigma_{n-1}^d = 2\sigma_{n-1}^s - \sigma_n^s,$$

$$N_{n-1}^d = 2N_{n-1}^s - N_n^s.$$

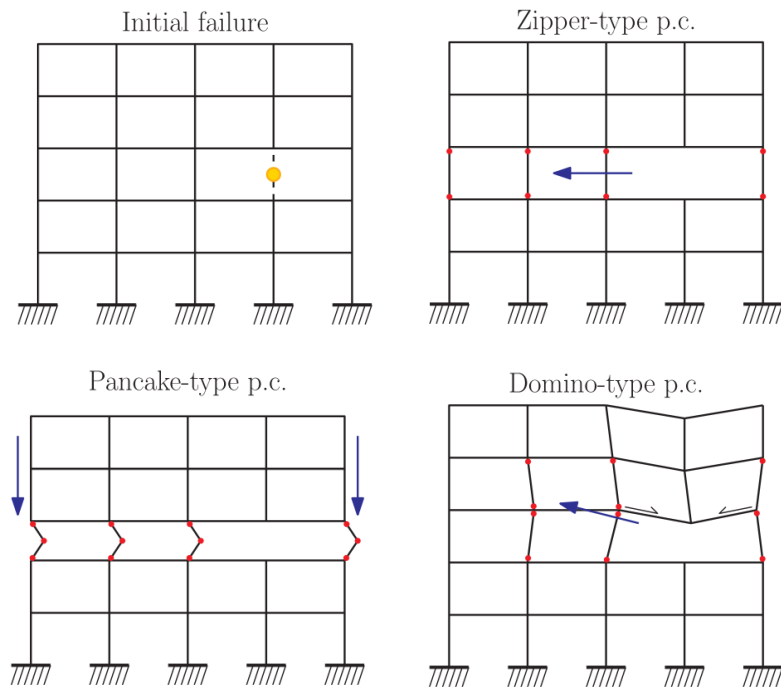


Сопоставление динамического и квазистатического методов на примере расчета железобетонного рамного каркаса

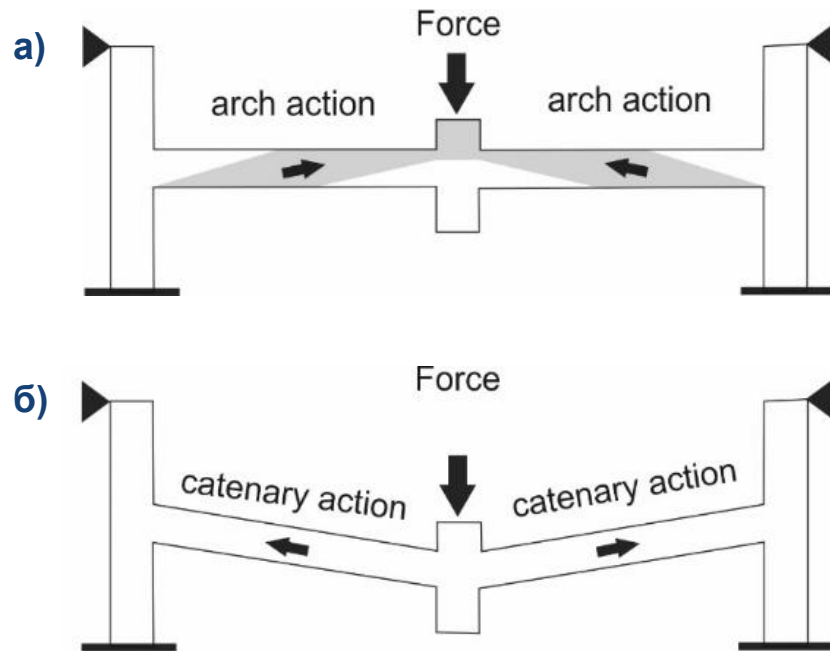


	Прямой динамический расчет	Квазистатический расчет push-down ($K_d=1,25$)	Квазистатический расчет pull-down ($K_d=1,25$)
Изгибающие моменты, кН*м			
Поперечные силы, кН			
Продольные силы, кН			

Механизмы распространения разрушений и сопротивления конструкций

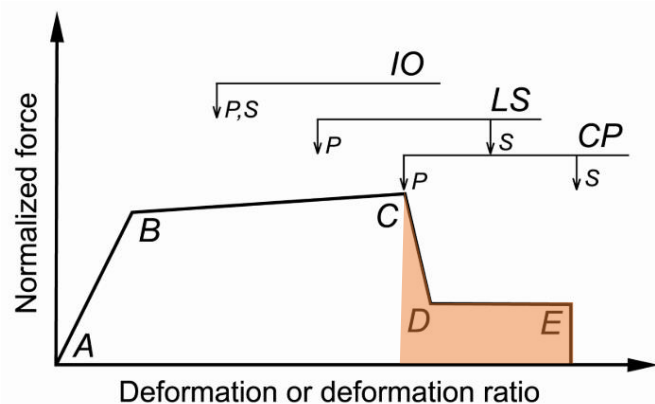


Механизмы распространения прогрессирующего обрушения каркасов зданий



Механизмы сопротивления ригелей перекрытий при разрушении колонны: а) арочный; б) цепной

Особенности деформирования несущих систем в особой расчетной ситуации и критерии предельного состояния

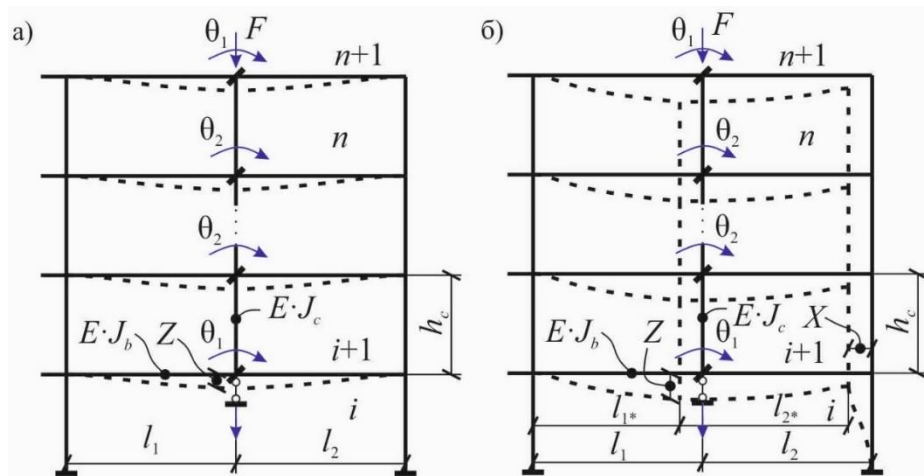


Обобщенный вид связи между нагрузкой и деформацией конструктивного элемента и критерии приемлемых последствий по FEMA, 2000



Общий вид железобетонной рамы по результатам испытаний Pham et al, 2022

Деформированное состояние каркаса в зоне возможного локального разрушения



Фрагмент каркаса в зоне возможного локального разрушения:

а) до перехода к цепной (мембранной) схеме работы перекрытия

б) при цепной (мембранной) схеме работы перекрытия над удаленным элементом

Параметры деформированного состояния фрагмента каркаса в зоне возможного локального разрушения при цепной (мембранной) работе конструкций перекрытий:

$$\begin{cases} Z = \frac{P_{ei} \cdot l_{1*} \cdot l_{2*}}{Q_c \cdot [(l_1 + l_2) \cdot (l_{1*} + l_{2*}) + (l_{1*} + l_{2*})^2]}; \\ X = (l_1 + l_2) - (l_{1*} + l_{2*}); \\ l_{1*} = \sqrt{l_1^2 + h_c^2 + Z^2}; \\ l_{2*} = \sqrt{l_2^2 + h_c^2 + Z^2}. \end{cases}$$

Z – вертикальный смещение узла над удаленной опорой,
 X – горизонтальное смещение узла сопряжения ригеля с колонной при $Z > (h_0 - a)$

P_{ei} – эквивалентная сосредоточенная нагрузка, действующая на ригели перекрытия i -ого этажа (над удаленной опорой);

l_{1*}, l_{2*} - проекции на ось x деформированных осей ригелей при работе по цепной схеме;

h_c – высота этажа;

Q_c – поперечная сила во внецентренно сжатом стержне с упругоподатливыми закреплениями, определяемая с учетом влияния продольного изгиба

Параметры НДС элементов рамного каркаса в зоне возможного локального разрушения

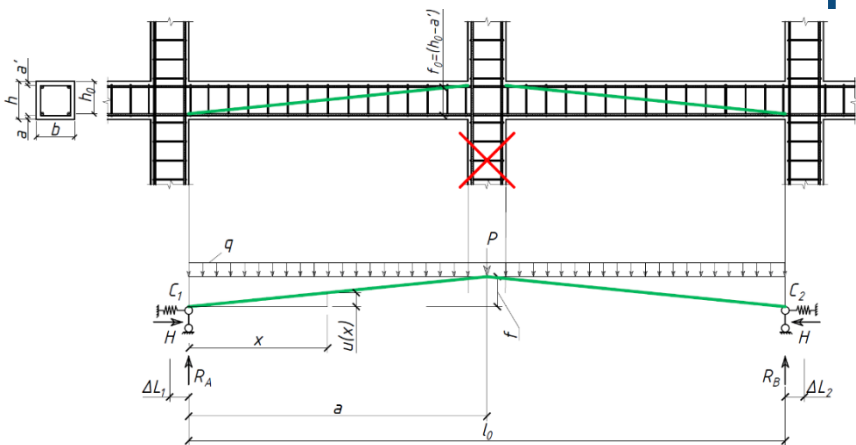


Схема двухпролетного ригеля в зоне возможного локального разрушения при арочной стадии работы

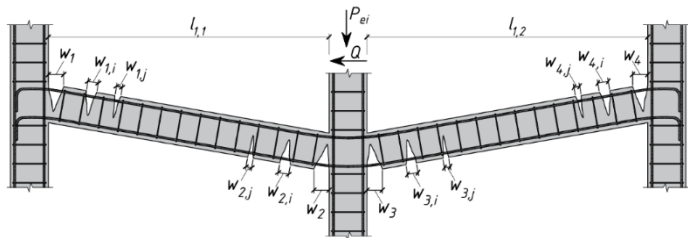


Схема работы ригелей по цепной схеме при удалении промежуточной опоры (колонны среднего ряда)

Параметры напряженно-деформированного состояния при арочной схеме работы ригелей перекрытия:

$$\sqrt{l^2 + f_0^2} - \sqrt{l_*^2 + f^2} = \frac{l \cdot (l - l_*)}{E_b \cdot A_{b,red}} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2};$$

$$M_r = z \cdot \frac{6 \cdot E \cdot J}{l^2} \cdot \left(3 + \frac{6 \cdot E \cdot J}{C_l \cdot l} \right) \cdot \left[1 - \left(2 + \frac{6 \cdot E \cdot J}{C_l \cdot l} \right) \cdot \left(2 + \frac{6 \cdot E \cdot J}{C_r \cdot l} \right) \right]^{-1};$$

$$C_i = \sum_k^n \frac{12 \cdot E \cdot J_k}{l_{0,k}^3}; \quad N = \Delta L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

f – стрела подъема арки в деформированном состоянии;

f_0 – то же в недеформированном состоянии;

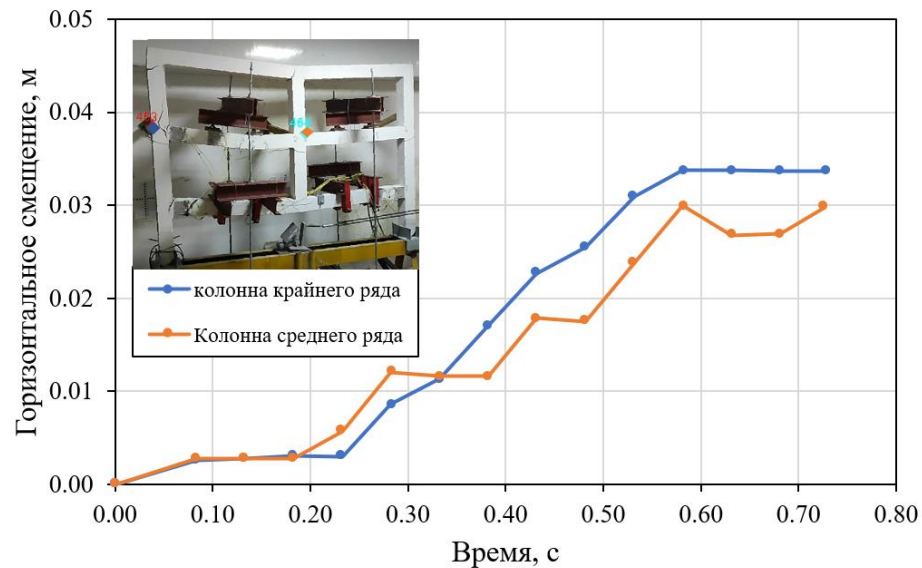
l_* , l – пролет с учетом распора на арочном уровне деформирования конструкции и начальный пролет на балочном уровне деформирования.

Параметры напряженно-деформированного состояния при цепной схеме работы ригелей перекрытия:

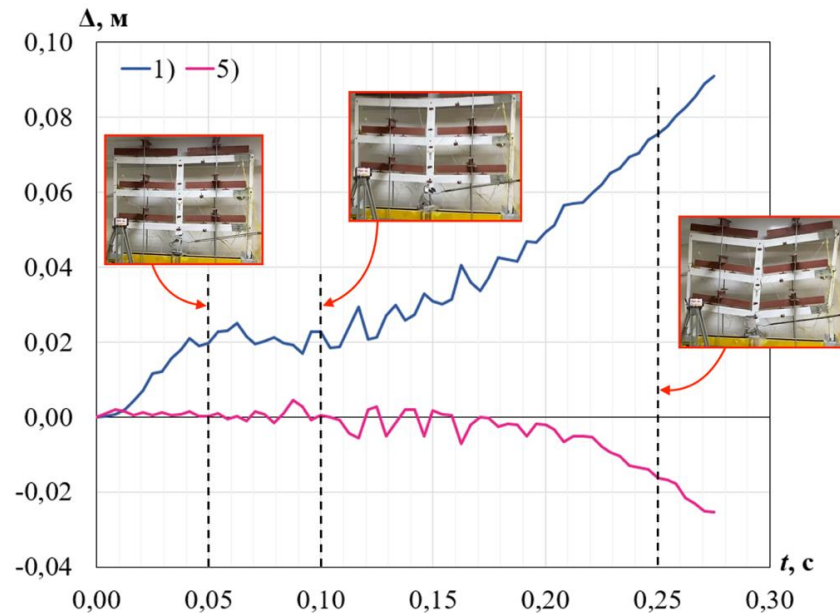
$$\frac{z}{l_1 - \Delta_{x1}} \cdot \varepsilon_{s1} \cdot A_{s1} \cdot E_{s1} + \frac{z}{l_2 - \Delta_{x2}} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot A_{s2} \cdot E_{s2} = P_{ei};$$

$$\varepsilon_{si} = \frac{w_i - w_{islip}}{w_{islip}} + \varepsilon_{bt,u}.$$

Анализ результатов экспериментальных исследований



Зависимость горизонтальных смещений нижних опорных сечений колонн третьего этажа от времени



Графики зависимости вертикального перемещения узла над удаленной опорой (1) и горизонтального перемещения узла сопряжения ригеля над первым этажом рамы с угловой колонной (5)

Учет влияния дискретных трещин на деформированное состояние и перераспределение усилий

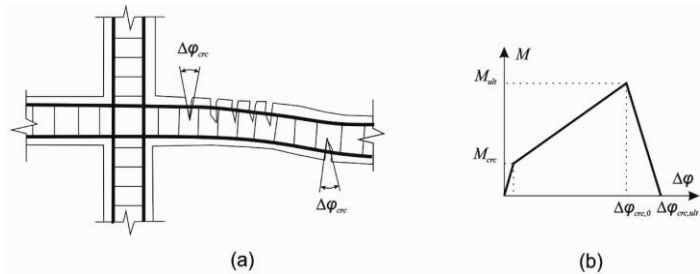
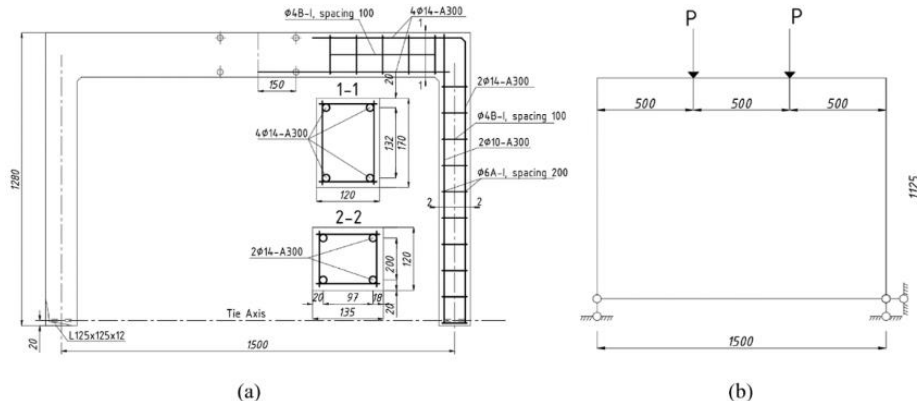


Схема трещинообразования (а) и общий вид диаграммы Момент – Угол поворота (б)

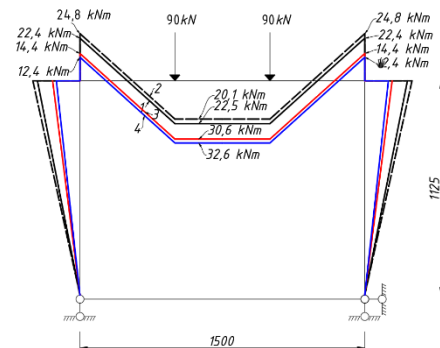
Определение характерных точек диаграммы Момент – Угол поворота:

$$C_i = 2 \frac{M_{ult} - M_{crc}}{\Delta \varphi_{crc,0}}, \quad a_{crc,0} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot l_s;$$

$$\Delta \varphi_{crc,0} = \frac{a_{crc,0}}{h_{crc}}, \quad h_{crc} = h_0 - \frac{x_{calc}}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{ct,ult}}{\varepsilon_{c,ult}} \right).$$

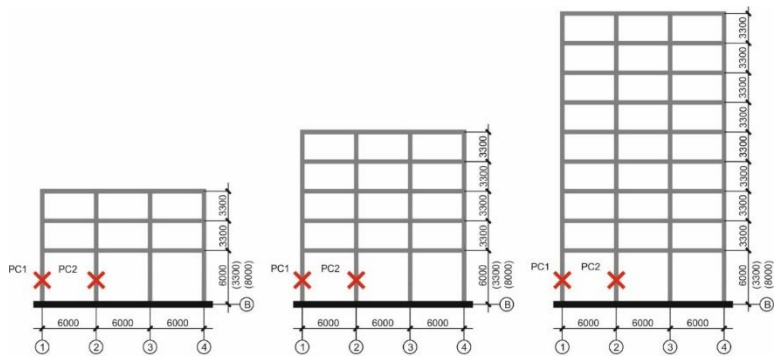
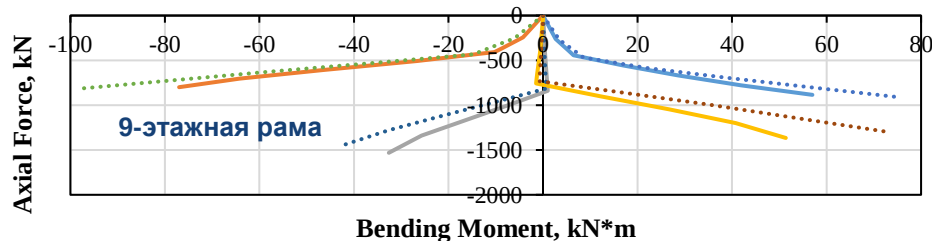
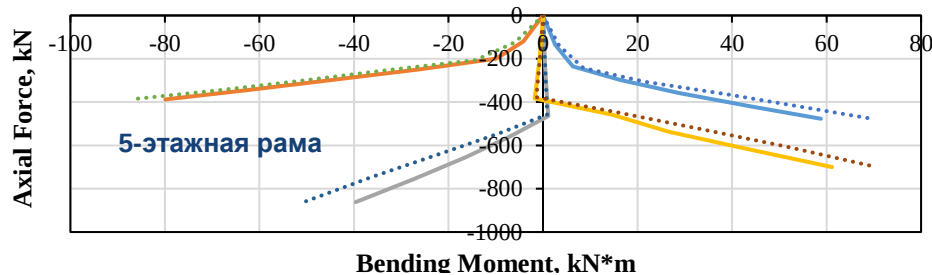
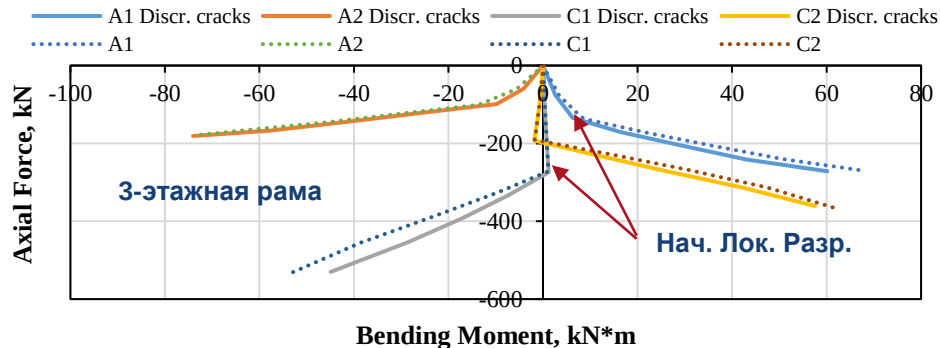


Верификационный пример:
 а) размеры и схема армирования
 П-образной рамы с затяжкой;
 б) схема приложения нагрузки;
 в) сопоставление результатов расчета:
 1 - при жестких узлах;
 2 - с учетом податливости узлов;
 3 - по экспериментальным данным;
 4 - по предлагаемой модели

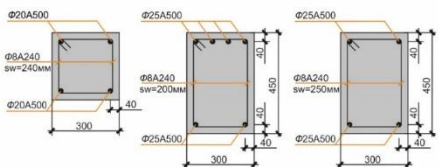


Пример расчета с учетом дискретных трещин

Усилия в колоннах до и после начального локального разрушения



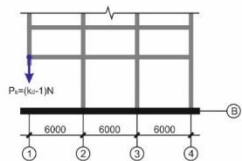
(а)



(б)

(в)

(г)

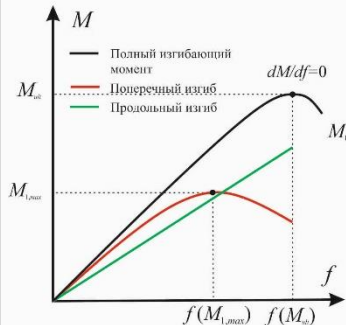
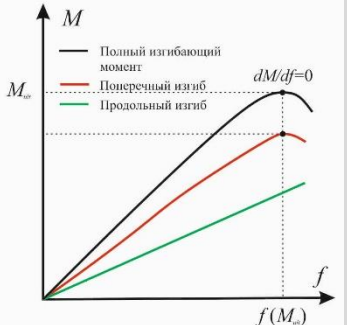
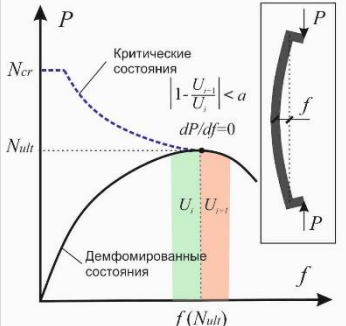


(д)

Исходные данные для анализа перераспределения усилий в несущей системе при возникновении начального локального разрушения:

- а) варианты железобетонных поперечных рам каркасов зданий и рассматриваемые расчетные ситуации (РС), связанные с отказом несущего элемента; б) поперечное сечение и схема армирования колонн; в) то же для приопорных участков ригелей; г) то же для ригелей в середине пролета

Критерии особого предельного состояния конструкций

Предельные усилия	Предельные деформации/прогибы	Энергетические критерии/критерии устойчивости деформирования
Защита здания и сооружения от прогрессирующего обрушения обеспечена, если для любых элементов и их соединений соблюдаются условия [СП 385.1325800, п.4.5]: $F \leq S,$ где F - усилия в конструктивных элементах или их соединениях, определяемые расчетом; S - несущая способность конструктивных элементов и их соединений, определяемая с учетом указаний раздела 5 СП 385.1325800.2018.	Требование по допустимым деформациям: $f \leq f_{ult},$ где f - деформации элемента от внешней нагрузки; f_{ult} - значение предельно допустимых деформаций элемента в соответствии с указаниями раздела 5 СП 385.1325800.2018.	Потеря устойчивости  Потеря прочности   Нарушение условия равновесия: $W < U$ W – работа внутренних усилий U – работа внешних нагрузок

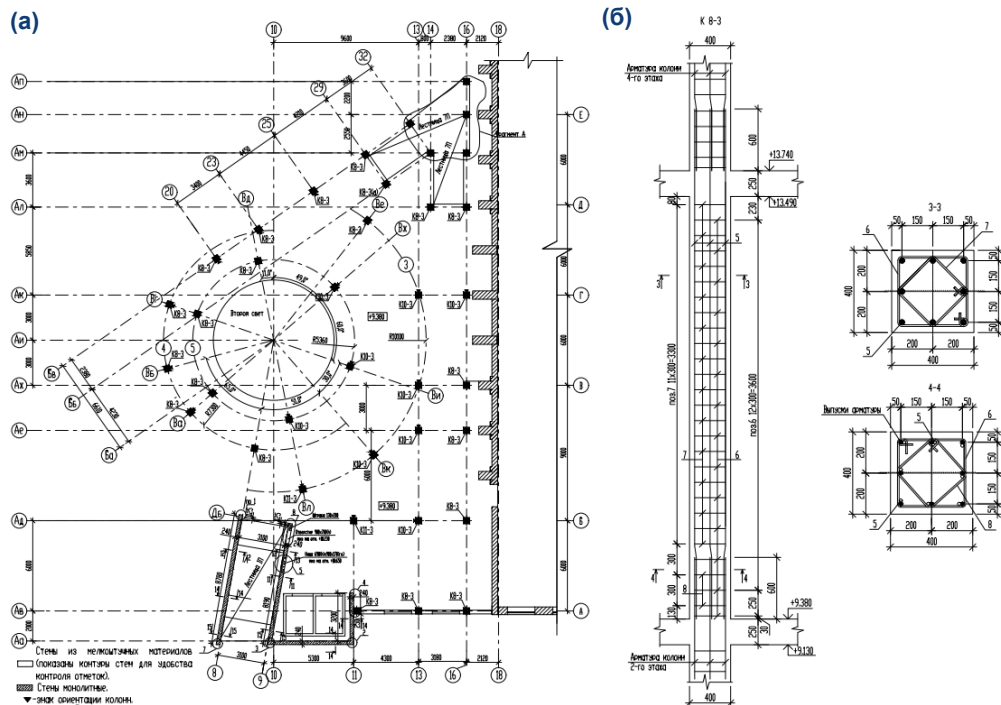
Понятие о живучести конструктивных систем зданий

Источник	Определение
GSA guidelines	Живучесть — способность конструктивной системы или ее элементов противостоять повреждениям без преждевременного и/или хрупкого разрушения в результате таких событий, как взрывы, удары, пожар или последствия человеческой ошибки, благодаря своей высокой прочности и ударной вязкости.
EC1 – Part 1-7	Живучесть — способность конструктивной системы противостоять таким событиям, как пожар, взрывы, удары или последствия человеческой ошибки, без развития повреждений/разрушений, непропорциональных первоначальному воздействию.
Bontempi et al.	Живучесть конструктивной системы определяется как ее способность противостоять непропорциональным повреждениям/разрушениям в результате начального локального отказа. Живучесть является внутренним свойством, присущим конструктивным особенностям несущей системы сооружения.
Agarwal and England	Живучесть – это способность конструктивной системы избегать непропорциональных последствий по сравнению с первоначальным ущербом.
Vrouwenvelder	Живучесть можно рассматривать как способность системы сохранять работоспособность при объеме повреждений, не непропорциональном причинам начальных повреждений. Концепция живучести заключается в том, что конструктивная система не должна быть слишком чувствительной к локальным повреждениям, независимо от причины повреждения.
JCSS	Живучесть конструктивной системы определяется как соотношение между прямыми рисками и общими рисками (суммарные риски равны сумме прямых и косвенных рисков) в течение определенного периода времени и с учетом всех возможных воздействий и повреждений элементов конструктивной системы.
Starossek and Haberland	Живучесть - нечувствительность конструктивной системы к первоначальным повреждениям. Конструктивная система обладает живучестью, если первоначальное повреждение не приводит к непропорциональному обрушению.
Fib Model Code 2010	Живучесть — это особый аспект механической безопасности, который относится к способности системы, подверженной случайным или исключительным нагрузкам (таким как пожар, взрыв, воздействие или последствия человеческих ошибок), выдерживать локальные повреждения некоторых несущих элементов без непропорционального разрушения.
Тамразян А.Г. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю.	Живучесть — это свойство, которое измеряет степень работоспособности конструкции, сохраняющуюся после ее повреждения. Под живучестью понимается способность конструктивной системы здания в целом сохранять ограниченную работоспособность при возникновении в ней локальных отказов несущих элементов вследствие воздействий неустойчивой природы.

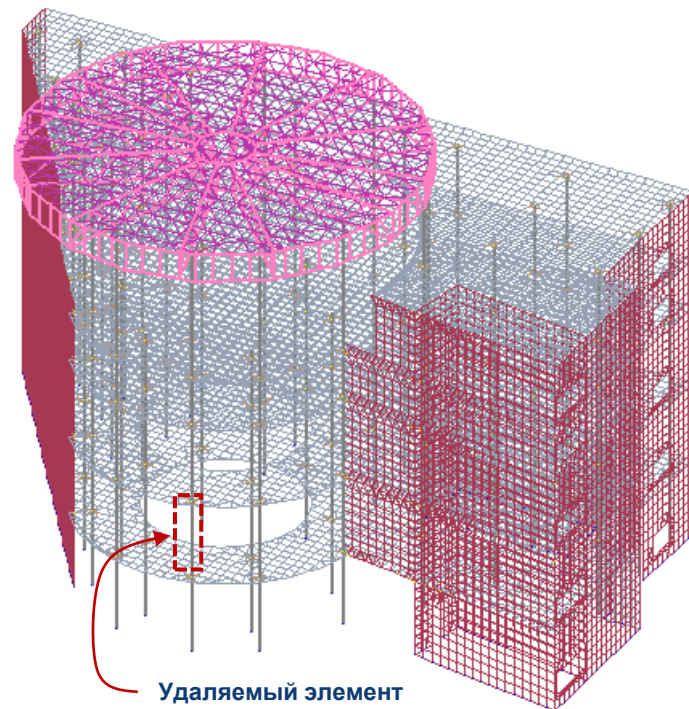
Подходы к оценке живучести конструктивных систем зданий

На основе анализа надежности/риска	На детерминистической основе при установленных воздействиях	На детерминистической основе при неустановленных воздействиях
Frangopol DM, Curley JP. Effects of damage and redundancy on structural reliability. J Struct Eng 1987;113:1533–49: $\beta_r = \frac{\beta_{intact}}{\beta_{intact} - \beta_{damaged}}$ $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$	Frangopol DM, Curley JP. Effects of damage and redundancy on structural reliability. J Struct Eng 1987;113:1533-49: $R = \frac{L_{damaged}}{L_{design}}$	Starossek U, Haberland M. Approaches to measures of structural robustness. Struct Infrastruct Eng 2011;7:625–31: $R_s = \min_j \frac{\det \mathbf{K}_j}{\det \mathbf{K}_0}$ $\mathbf{K}_0$ - матрица жесткости по первичной расчетной схеме несущей системы $\mathbf{K}_j$ - матрица жесткости по вторичной расчетной схеме несущей системы с учетом выключения из ее работы элемента/связи
Maes MA, Fritszons KE, Glowienka S. Structural robustness in the light of risk and consequence analysis. Struct Eng Int 2006;16(2):101–7 $ROI = \min_i \frac{P_{f0}}{P_{fi}}$	Fallon CT, Quiel SE, Naito CJ. Uniform pushdown approach for quantifying building-frame robustness and the consequence of disproportionate collapse. J Perform Constr Facil 2016: $RRI = \frac{L_{damaged} - L_{design}}{L_{intact} - L_{design}} = \frac{\lambda_{damaged} - 1}{\lambda_{intact} - 1}$	

Пример расчета каркаса здания филармонии на особое воздействие: конструктивные решения

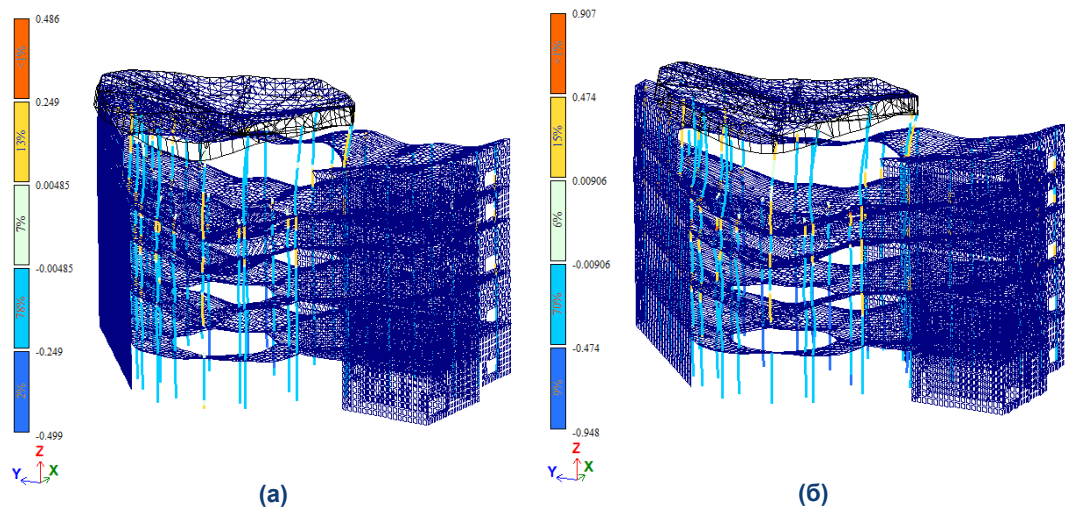


План этажа здания, на котором рассматривается колонна (а)
схема армирования колонны (б)



Конечно-элементная модель пристраиваемого блока

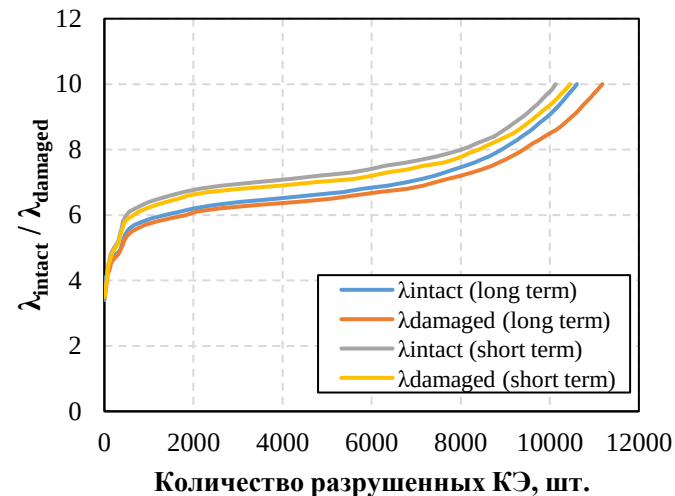
Пример расчета каркаса здания филармонии на особое воздействие: результаты расчета



Относительные деформации в колоннах несущей системы здания филармонии в результате локального разрушения колонны 2-го этажа в осях 4/Вб:

а – полученные на основе диаграмм состояния бетона при кратковременном нагружении;

б – полученные на основе модифицированных диаграмм состояния бетона с учетом длительности выдержки при статической нагрузке



Количество разрушенных конечных элементов модели несущей системы здания в зависимости от параметрической нагрузки

Выявленные проблемы и направления для исследований

- (1) **Определение критериев оценки несущей способности конструкций и устойчивости к обрушению конструктивной системы в целом или отдельных её частей с учетом специфических уровней напряженно-деформированного состояния поврежденных каркасов зданий** (существующие критерии преимущественно ориентированы на оценку прочности сечений; интегральные критерии позволяют оценить несущую способность только балочных конструкций)
- (2) **Выбор и калибровка параметров формата безопасности с учетом специфики особой расчетной ситуации и выбранных критериев оценки несущей способности / устойчивости к обрушению** (прямой вероятностный расчет, метод предельных состояний / частных коэффициентов, метод глобального коэффициента запаса и др.)
- (3) **Оценка и нормирование количественных параметров живучести, определения допустимых повреждений / разрушений в зависимости от уровней ответственности сооружений и рассматриваемых типов угроз их механической безопасности**
- (4) **Проблема назначения локального разрушения / повреждения** (учет существующих и прогнозируемых угроз несущим элементам; риска реализации этих угроз применительно к отдельным несущим элементам конструктивной системы; уровней повреждений)
- (5) **Проблема моделирования структурных изменений при особой расчетной ситуации**, связанных преобразованием двусторонних связей в односторонние (переход ригелей к работе по цепной схеме); резкого изменения расчетных длин и деградации узловых закреплений; усиление влияния эффектов второго порядка (продольный изгиб); возникновением новых односторонних связей (заполнение проемов в рамных каркасах) и обоснованности их учета; моделирования динамических эффектов при смене режимов сопротивления или падении обломков в случае допускаемого частичного обрушения
- (6) **Проблема применения упрощенных, основанных на энергетических принципах, инженерных методов расчета** (квазистатических методов), обоснования допустимых границ их использования и калибровка параметров
- (7) **Учет изменения прочности, деформативности и диссипативных свойств бетонов** при оценки живучести конструктивных систем зданий с учетом сроков эксплуатации
- (8) **Проектирование диссипативных несущих систем** на основе использования новых высокопрочных материалов и разработки новых конструктивных решений узлов с улучшенными пластическими свойствами, способных рассеивать динамическую составляющую воздействий



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!