

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
(ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ))

Кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Деформирование арматуры в железобетонных конструкциях при многостержневом армировании

Магистерская

Направление подготовки 08.04.01 «Строительство»

Направленность (магистерская программа) «Промышленное и гражданское строительство»

Обучающийся:

Радченкова Наталья Леонидовна

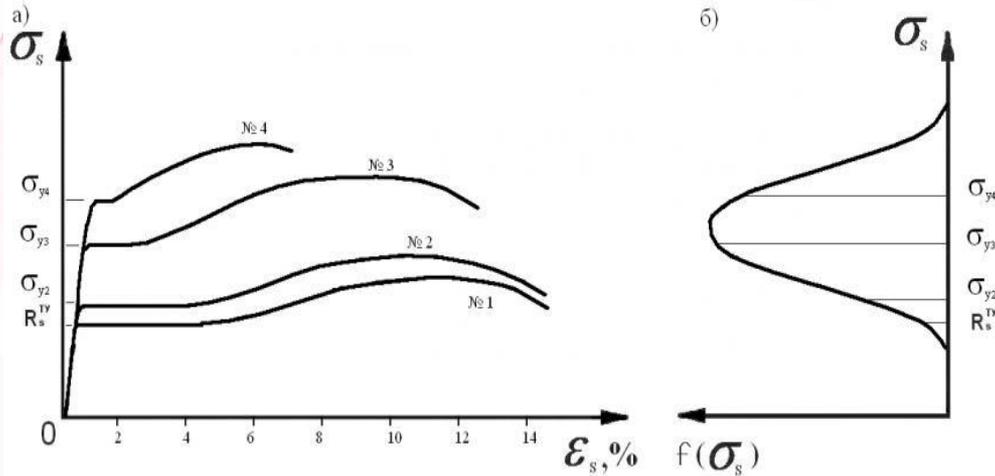
Научный руководитель :

Шавыкина Марина Витальевна,

канд. техн. наук, доцент

Москва 2019

Актуальность темы



При многостержневом армировании, характерном для большинства железобетонных конструкций, прочность стержней различна и находится выше нормируемых значений.

Однако эти резервы в расчёте не используются, хотя их учёт привёл бы к ряду положительных эффектов:

1

Снижение расхода стали

2

Выявление резервов несущей способности

3

Повышение надёжности работы конструкций

Цель и задачи работы

Цель работы:

- Выявление резервов несущей способности и надёжности арматуры со случайными свойствами при многостержневом армировании на основе более полного использования её прочностных и деформативных свойств при воздействии нагрузок.

Задачи работы:

- Провести анализ механизма поведения арматурных стержней под воздействием нагрузок на основе вероятностной модели сопротивления разрушению и деформированию многоэлементной арматуры со случайными свойствами.
- Определить вероятностные характеристики распределения равномерного относительного удлинения многостержневой арматуры в зависимости от числа стержней в опасном сечении.
- Выполнить расчёт вероятности безопасной работы монолитного железобетонного перекрытия с многостержневой арматурой при аварийном разрушении нижележащей колонны.

Нормативное и расчётное сопротивление многоэлементной арматуры

В конструкциях с многоэлементной арматурой усилия в отдельных стержнях в предельном состоянии не одинаковы и зависят от разброса прочностных и деформативных свойств арматуры. В трудах научной школы профессора В.П. Чиркова назначение расчётных сопротивлений предложено осуществлять с учётом разброса случайных параметров.

Коэффициент вариации распределения прочности многоэлементной арматуры:

$$V_n = \frac{V_1}{\sqrt{n}};$$

где V_1 – коэффициент вариации, полученный при стандартном испытании ($n = 1$)

$$V_1 = \frac{\sqrt{\overline{R_s^{(1)}}}}{\overline{R_s^{(1)}}};$$

n – число арматурных стержней;

$\overline{R_s^{(1)}}$, $\sqrt{\overline{R_s^{(1)}}}$ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение прочности арматуры при испытании одиночных стержней.

Расчётное и нормативное сопротивление многоэлементной арматуры:

$$R_s^{(n)} = \overline{R_s^{(1)}} \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot V_1}{\sqrt{n}}\right); \quad R_{sn}^{(n)} = \overline{R_s^{(1)}} \cdot \left(1 - \frac{1,64 \cdot V_1}{\sqrt{n}}\right);$$

или в относительном виде:

$$R_s^{(n)} = R_s^{(1)} \cdot f(n); \quad R_{sn}^{(n)} = R_s^{(1)} \cdot f(n)_n;$$

Функции, учитывающие повышение расчётного и нормативного сопротивлений многоэлементной арматуры:

$$f(n) = \frac{1 - \frac{3 \cdot V_1}{\sqrt{n}}}{1 - 3 \cdot V_1}; \quad f(n)_n = \frac{1 - \frac{1,64 \cdot V_1}{\sqrt{n}}}{1 - 1,64 \cdot V_1};$$

Расчётные сопротивления арматуры в зависимости от количества стержней

Увеличение числа элементов (проволок или стержней) приводит к повышению расчётных сопротивлений арматуры, так как её работа приближается к работе системы с параллельным соединением элементов.

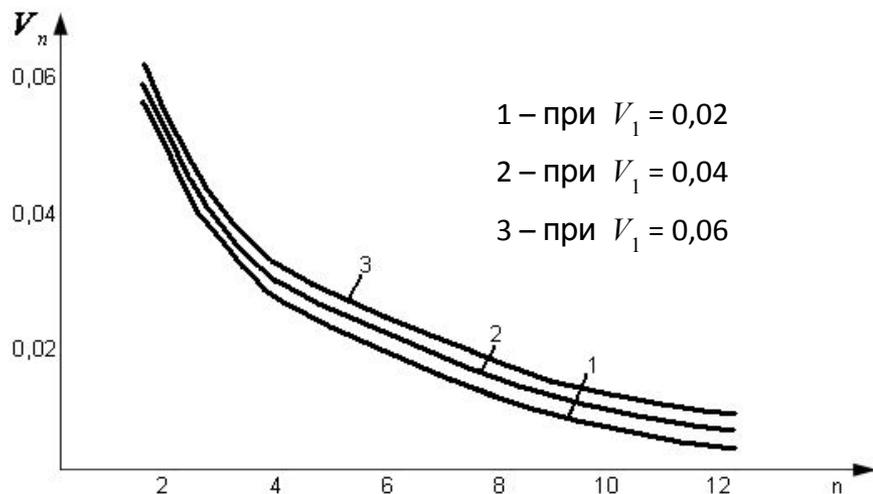
Расчётное сопротивление многоэлементной арматуры для различного количества

Класс арматуры	Диаметр, мм	Коэфф-т вариации V_1	Количество стержней n , шт											
			1	2	4	6	8	10	26	38	60	80	100	
A240	6-40	0,05	215	227	235	239	240	240	240	240	240	240	240	240
A400	10-40	0,05	355	381	394	400	400	400	400	400	400	400	400	400
A500C	10-40	0,05	435	481	498	500	500	500	500	500	500	500	500	500

Класс арматуры	Диаметр, мм	Коэфф-т вариации V_1	Количество стержней n , шт											
			1	2	4	6	8	10	26	38	60	80	100	
A400	10	0,0241	377	386	392	395	396	397	400	400	400	400	400	400
A400	36	0,0248	367	375	381	384	386	387	390	391	392	393	393	393
A500C	10	0,0275	481	493	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
A500C	16	0,0187	466	474	480	483	484	485	486	489	490	491	491	491

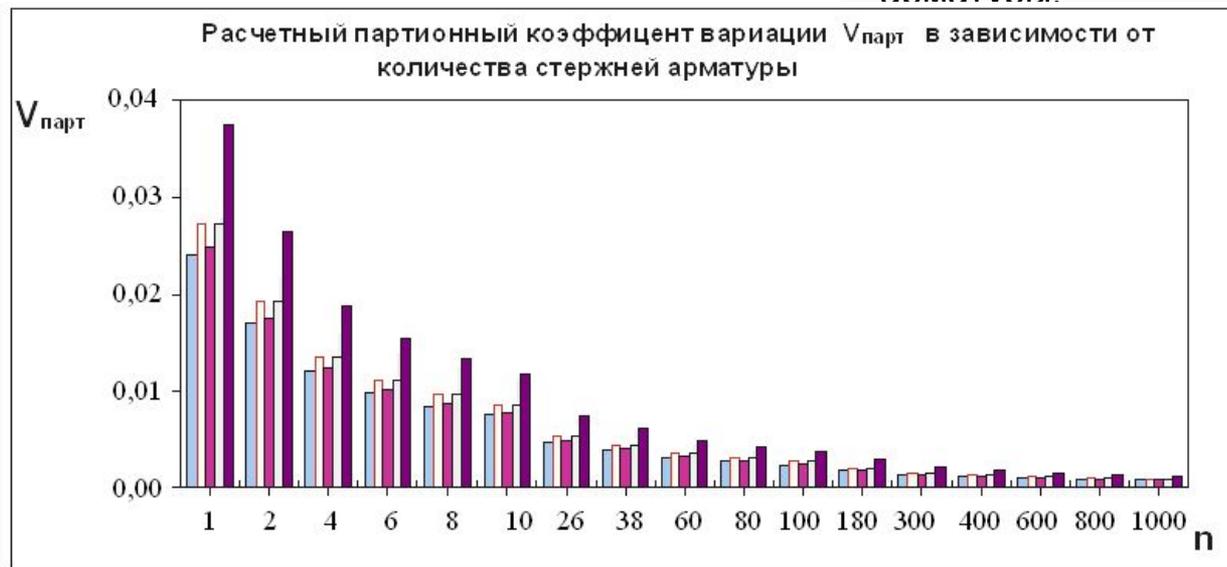
Примечание. Значение расчётных сопротивлений не должно превышать браковочных минимумов, установленных для арматурных сталей.

Зависимость коэффициента вариации от количества арматурных элементов



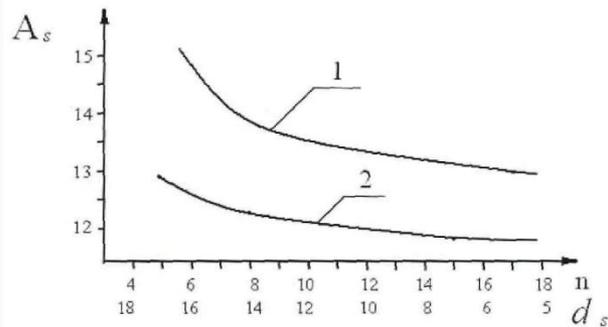
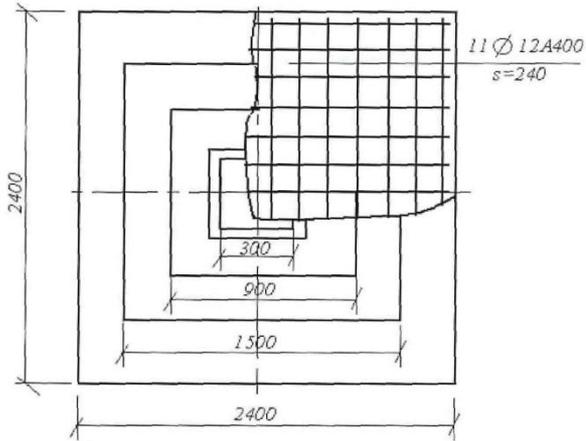
Арматура попадает в железобетонную конструкцию, как правило, из одной партии металла, поставленной на завод железобетонных изделий или строительную площадку.

Поэтому в расчетах прочности многоэлементной арматуры следует применять партионный коэффициент вариации V_1 , полученный для внутриплавочного рассеивания прочности арматуры.



На основе анализа статистической информации установлено, что партионный коэффициент вариации V_1 в 1,5-2,0 раза меньше коэффициента вариации прочности арматуры в генеральной совокупности.

Многостержневое армирование подошвы фундамента



1 – расчёт по нормативной методике;

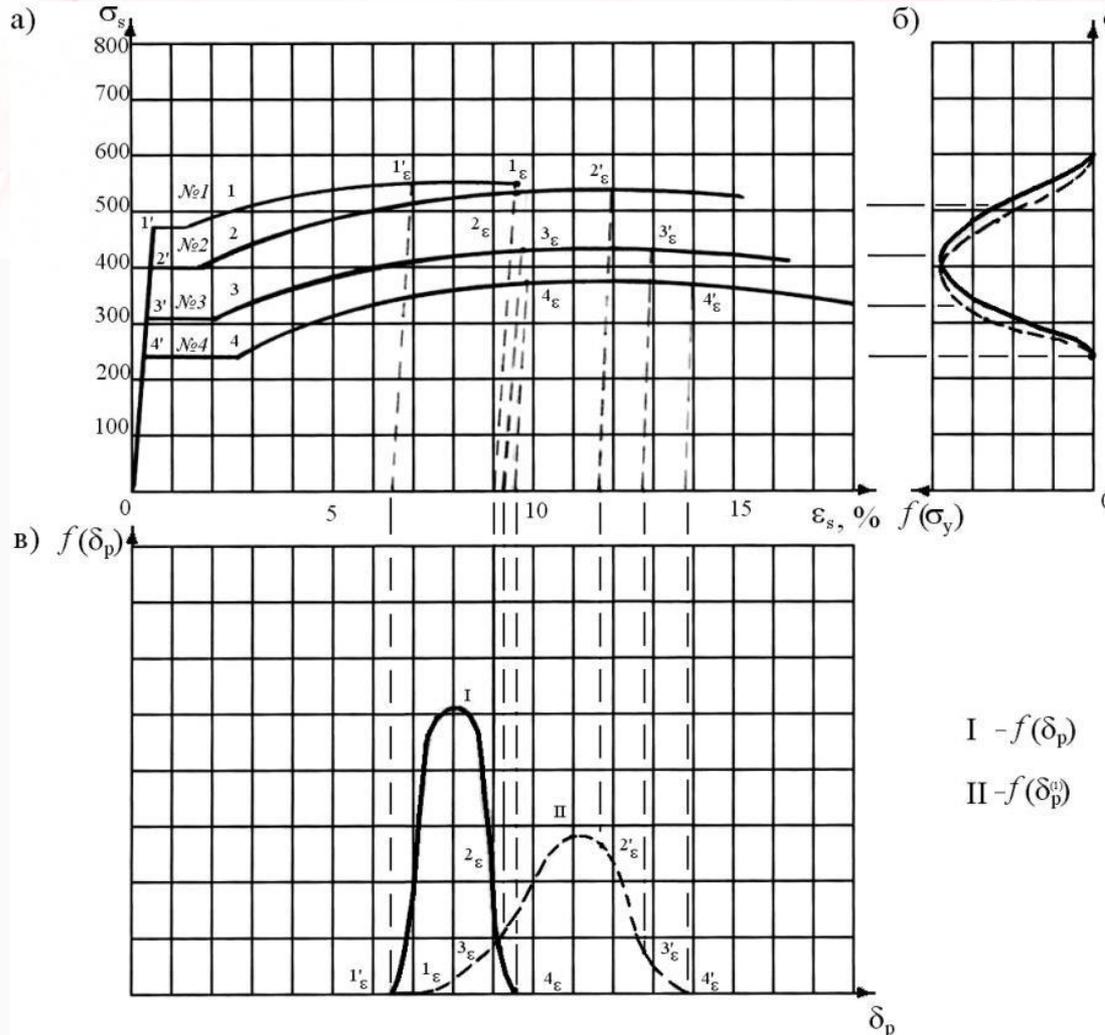
2 – расчёт по методике В.П. Чиркова

Требуемая площадь многоэлементной арматуры фундамента

№ п/п	Расчётное сопротивление, МПа	Шаг, мм	Диаметр, мм	Количество стержней, шт	Площадь арматуры, см ²
Расчёт по нормативной методике					
1	355	140	10	17	13,345
2	355	270	14	9	13,851
3	355	340	16	7	14,077
4	355	400	18	6	15,270
Расчёт по методике В.П. Чиркова					
1	400	160	10	15	11,850
2	395	300	14	8	12,312
3	392	400	16	6	12,596
4	390	480	18	5	12,725

Вывод: рассмотрение арматуры фундамента как многоэлементной системы со случайными свойствами, приводит к уменьшению расхода стали и увеличению прочности на 10-12%.

Равномерные относительные деформации многоэлементной арматуры



Для обеспечения совместной работы многоэлементной арматуры необходимо, чтобы стержни имели достаточное равномерное удлинение.

При отказе конструкции вначале происходит разрыв арматурного стержня, обладающего наименьшей растяжимостью.

В этот момент относительные деформации δ_p остальных стержней будут меньше значений, полученных при испытаниях отдельной арматуры. При учёте этого фактора плотность распределения сдвигается влево.

---- без учёта деформаций арматурных элементов при отказе;
 ____ с учётом деформаций арматурных элементов при отказе

Вероятностные характеристики деформаций многоэлементной арматуры

Переход от вероятностных характеристик относительных равномерных деформаций одиночных стержней арматуры к соответствующим характеристикам многоэлементной арматуры осуществляется на основе применения положений теории вероятностей – теоремы о распределении минимумов нескольких случайных величин.

Функция и плотность распределения минимумов относительных деформаций многоэлементной арматуры:

$$F_n(\delta_p) = \prod_{i=1}^n [1 - F_i^{(1)}(\delta_p^{(1)})]^n;$$

$$f_n(\delta_p) = n \cdot [1 - F^{(1)}(\delta_p^{(1)})]^{n-1} \cdot f(\delta_p^{(1)});$$

n – число арматурных стержней;

$f(\delta_p^{(1)})$ – плотность распределения предельных равномерных относительных деформаций при испытании одиночных стержней арматуры.

Математическое ожидание и дисперсия :

$$\bar{\delta}_p^{(1)} = n \int_{\delta_{pi,\min}}^{\delta_{pi,\max}} \delta_p [1 - F(\delta_p^{(1)})]^{n-1} \cdot f(\delta_p^{(1)}) d\delta_p;$$

$$\sigma_{\delta_p^{(1)}}^2 = n \int_{\delta_{pi,\min}}^{\delta_{pi,\max}} (\delta_p - \bar{\delta}_p)^2 \cdot [1 - F(\delta_p^{(1)})]^{n-1} \cdot f(\delta_p^{(1)}) d\delta_p;$$

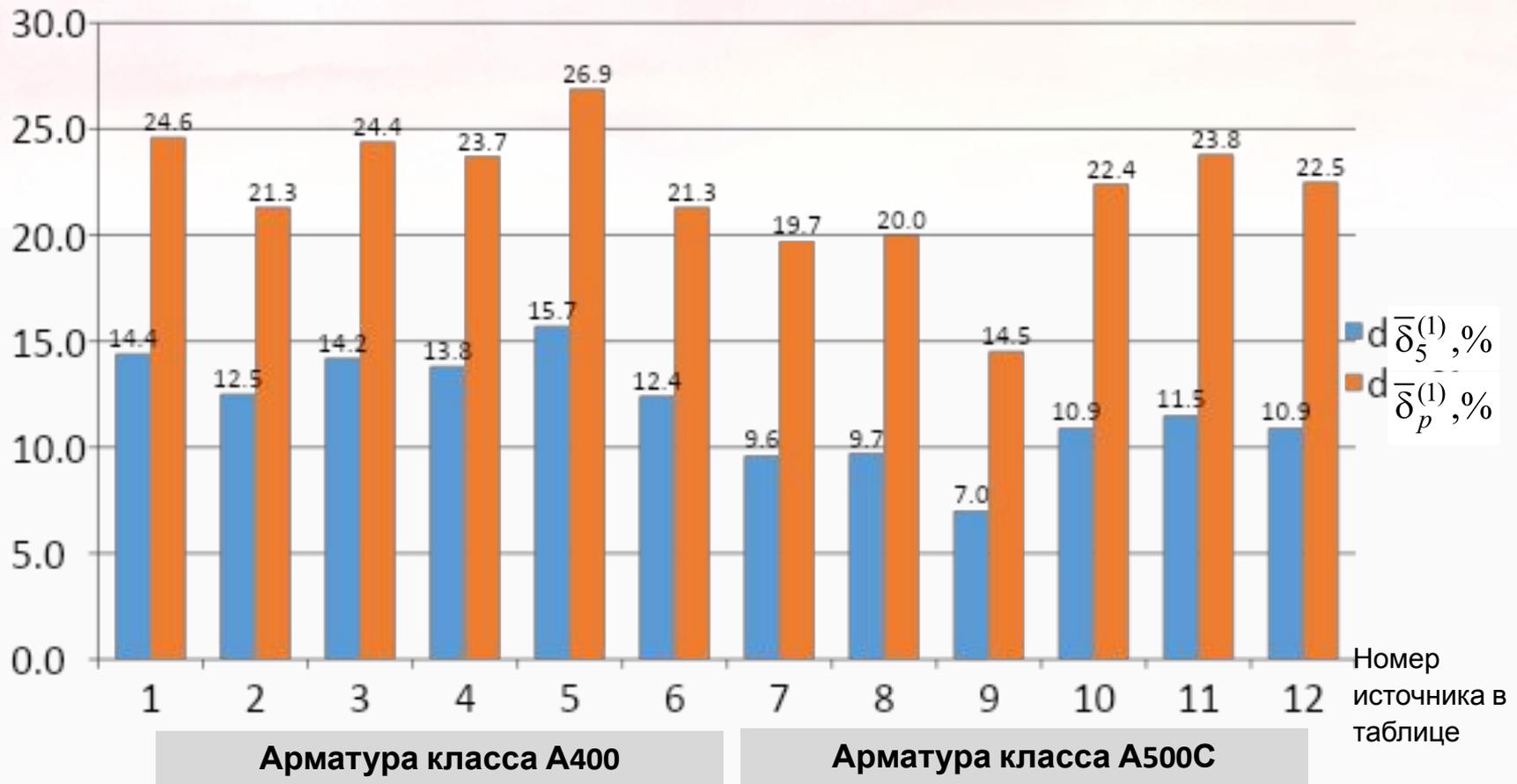
Среднее значение и дисперсия равномерных относительных деформаций многоэлементной арматуры при нормальном законе распределения:

$$\bar{\delta}_p = \bar{\delta}_p^{(1)} - 3,5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt[4]{n}}\right) \cdot \sigma_{\delta_p^{(1)}}; \quad \sigma_{\delta_p} = \frac{\bar{\delta}_p^{(1)}}{\sqrt[4]{n}}$$

Статистические данные о равномерных деформациях после разрыва арматуры

№ п/п	Класс арматурной стали, марка	Количество о опытов	Математическое ожидание $\bar{\delta}_p^{(1)}, \%$	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{D}\delta_p^{(1)}, \%$	Коэффициент вариации $V\delta_p^{(1)}$
1	A400, 25Г2С	3184	14,4	3,5	0,247
2	A400, 35ГС	809	12,5	3,4	0,274
3	A400, 25Г2С	2000	14,2	2,8	0,198
4	A400, 35ГС	7876	13,8	2,4	0,174
5	A400, 35ГС	809	15,7	3,2	0,204
6	A400С, Ст3пс	1800	12,4	2,0	0,160
7	A500С, Ст3пс	2800	9,6	1,6	0,169
8	A500С, Ст3пс	219	9,7	1,7	0,173
9	A500С, Ст3сп	295	7,0	1,9	0,270
10	A500С, Ст3пс	194	10,9	1,4	0,131
11	A500С, Ст3Гпс	144	11,5	2,7	0,233
12	A500С, Ст3Гпс	150	10,9	1,6	0,146

Относительные удлинения арматуры по данным сертификатов



$\bar{\delta}_p^{(1)}, \bar{\delta}_5^{(1)}$ – соответственно равномерные и измеренные на базе 5 диаметров относительные деформации арматуры после разрыва

Расчётные значения равномерных деформаций после разрыва арматуры

Арматура класса А400

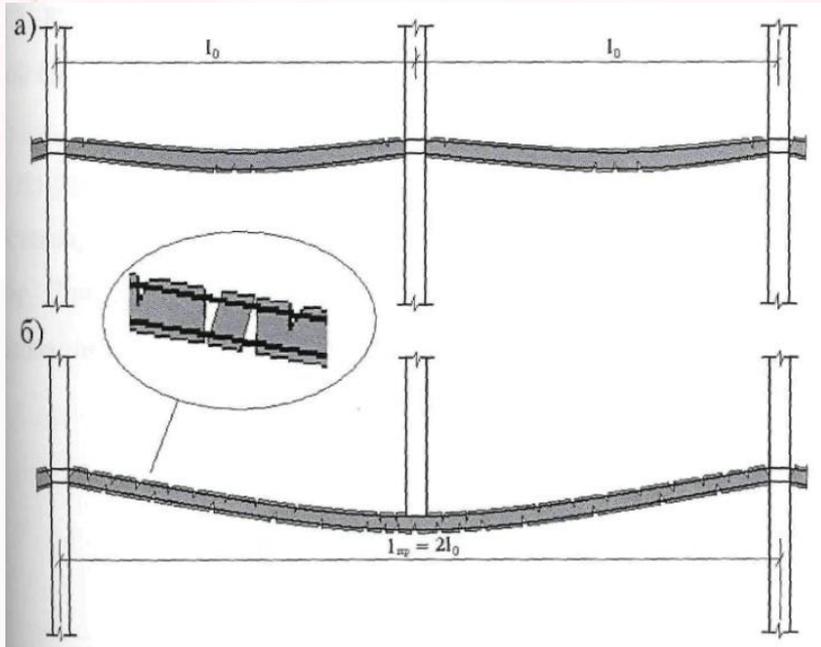
№ п/п	Количество арматурных стержней n , шт	Математическое ожидание $\bar{\delta}_p^{(1)}$, %	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{D}\delta_p^{(1)}$, %	Коэффициент вариации $V\delta_p^{(1)}$	Значение бр с обеспеченностью 0,95, %
1	2	12,5	2,0	0,162	9,15
2	4	11,3	1,7	0,150	8,56
3	6	10,8	1,5	0,142	8,25
4	8	10,4	1,4	0,137	8,05
5	10	10,1	1,3	0,133	7,91
6	26	9,1	1,1	0,117	7,38
7	38	8,8	1,0	0,110	7,20
8	60	8,4	0,9	0,102	7,00
9	80	8,2	0,8	0,098	6,98
10	100	8,1	0,8	0,094	6,81

Расчётные значения равномерных деформаций после разрыва арматуры

Арматура класса А500С

№ п/п	Количество арматурных стержней n , шт	Математическое ожидание $\bar{\delta}_p^{(1)}$, %	Среднеквадратическое отклонение $\sqrt{D}\delta_p^{(1)}$, %	Коэффициент вариации $V\delta_p^{(1)}$	Значение бр с обеспеченностью 0,95, %
1	2	8,8	1,4	0,163	6,41
2	4	8,0	1,2	0,151	5,99
3	6	7,6	1,1	0,144	5,77
4	8	7,3	1,0	0,139	5,63
5	10	7,1	1,0	0,135	5,53
6	26	6,4	0,8	0,118	5,15
7	38	6,1	0,7	0,111	5,02
8	60	5,9	0,6	0,104	4,89
9	80	5,7	0,6	0,099	4,81
10	100	5,6	0,5	0,095	4,75

Работа железобетонного перекрытия как вантовой системы



Уровень надёжности:

$$P = 0,5 + \Phi(\gamma)$$

где $\Phi(\gamma)$ – интеграл вероятностей:

$$\Phi(\gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\gamma} \exp(-0,5x^2) dx$$

После разрушения нижерасположенной колонны бетон плиты и ригеля перекрытия выходит из строя и нагрузка воспринимается стержнями стальной арматуры, работающими как гибкие пологие нити.

Оценку надёжности работы конструкции при её работе как вантовой системы предлагается осуществлять с использованием **характеристики безопасности**:

$$\gamma = \frac{\bar{q}_{ud} - \bar{q}_0}{\sqrt{\sigma_{q_{ud}}^2 + \sigma_{q_0}^2}} \geq \gamma_n$$

где

$\bar{q}_{ud}, \sigma_{q_{ud}}^2$ – математическое ожидание и дисперсия предельной нагрузки, выдерживаемой многоэлементной арматурой в составе перекрытия;

$\bar{q}_0, \sigma_{q_0}^2$ – математическое ожидание и дисперсия приведенной нагрузки на перекрытие;

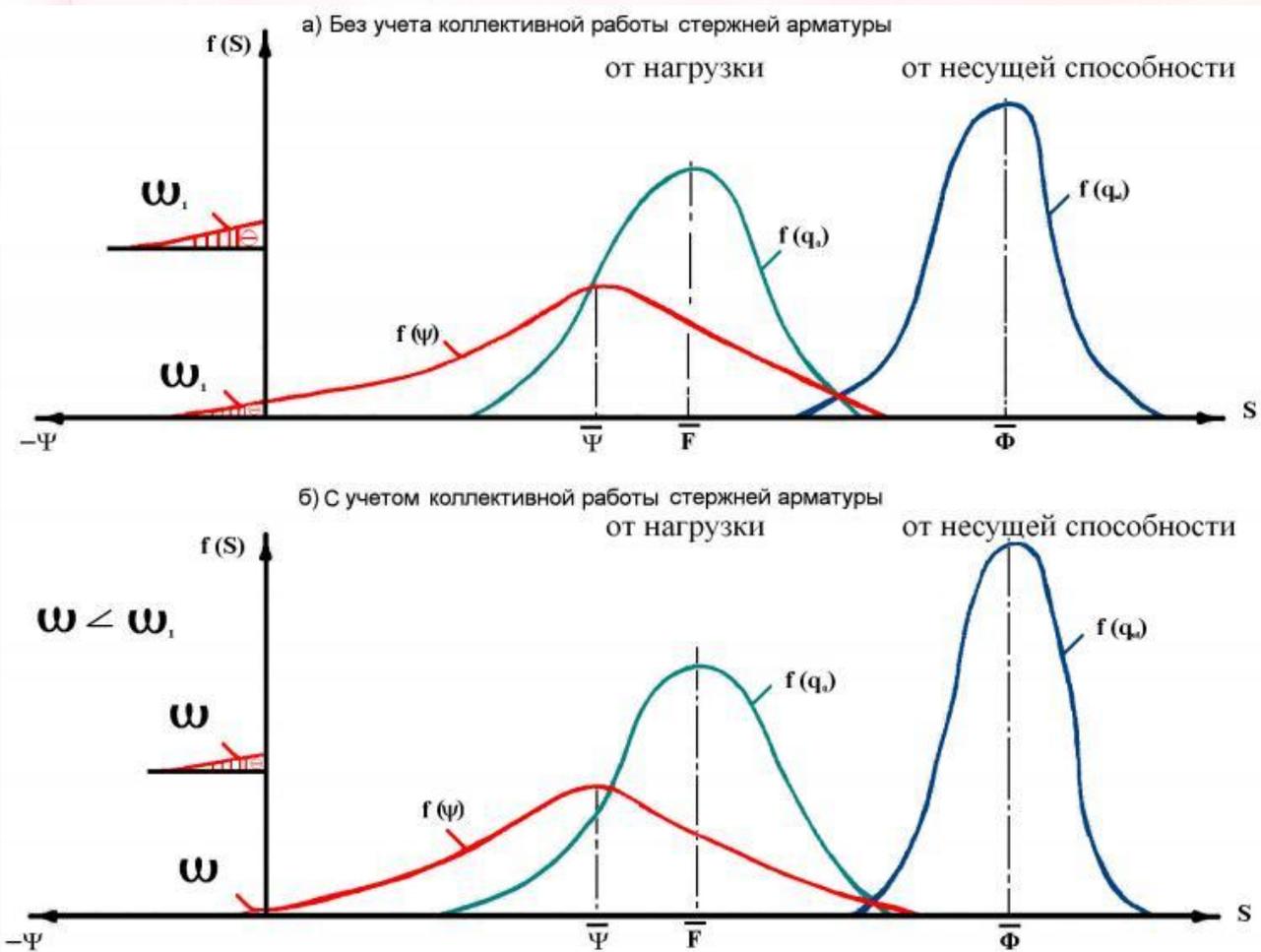
γ_n – характеристика безопасности, соответствующая нормативному значению

надёжности P :

$$\gamma_n = 3^n,$$

$$P_n = 0,99865$$

Условие надёжности неповреждённых элементов



Условие обеспечения безопасной работы неповреждённых элементов :

$$\bar{q}_{ud} \geq \bar{q}_0 + \gamma_n \cdot \sqrt{\sigma_{q_{ud}}^2 + \sigma_{q_0}^2}$$

или

$$\bar{q}_{ud} \geq K \cdot \bar{q}_0,$$

где K представляет собой коэффициент запаса:

$$K = \frac{1 + \sqrt{1 - (\gamma_n^2 \cdot V_{q_0}^2 - 1) \cdot (\gamma_n^2 \cdot V_{q_{ud}}^2 - 1)}}{1 - \gamma_n^2 \cdot V_{q_{ud}}^2}$$

$V_{q_{ud}}, V_{q_0}$ – коэффициенты вариации несущей способности многоэлементной арматуры и нагрузки

Определение характеристик при вероятностном методе расчёта

Резерв несущей способности определяется благодаря учёту развития пластических деформаций в многоэлементной арматуре после полного разрушения бетона и перехода к работе перекрытия как вантовой системы.

Условие отсутствия разрыва арматуры:

$$\begin{aligned}\bar{q}_{ud} &\geq \bar{q}_0; \\ \bar{Z}_{1u} &\geq \bar{Z}_{\max}; \\ \bar{\varepsilon}_{su} &\geq \delta_p\end{aligned}$$

Математическое ожидание и дисперсия предельной нагрузки, выдерживаемой арматурой:

$$\bar{q}_{ud} = \frac{\pi^3 \cdot \bar{N}_{sd}}{32 \cdot l_1^2} \cdot \bar{Z}_{1u}; \quad \mathbb{D}_{q_{ud}}^2 = \left(\frac{\partial q_{ud}}{\partial N_{sd}} \right) \cdot \mathbb{D}_{N_{sd}}^2 + \left(\frac{\partial q_{ud}}{\partial Z_{1u}} \right) \cdot \mathbb{D}_{Z_{1u}}^2;$$

$$\frac{\partial q_{ud}}{\partial N_{sd}} = \frac{\pi^3}{32 \cdot l_1^2} \cdot \bar{Z}_{1u}; \quad \frac{\partial q_{ud}}{\partial Z_{1u}} = \frac{\pi^3 \cdot \bar{N}_{sd}}{32 \cdot l_1^2};$$

$\bar{N}_{sd}, \mathbb{D}_{N_{sd}}^2$ – математическое ожидание и дисперсия растягивающих усилий в ригеле и плите перекрытия вдоль оси OX;

$\bar{Z}_{1u}, \mathbb{D}_{Z_{1u}}^2$ – математическое ожидание и дисперсия предельного (расчетного) прогиба над разрушенной колонной.

Математическое ожидание и дисперсия прогиба над разрушенной колонной:

$$\bar{Z}_{1u} = 4 \cdot l_1 \cdot \frac{\sqrt{\bar{\varepsilon}_{su}}}{\pi};$$

$$\mathbb{D}_{Z_{1u}}^2 = \left(\frac{\partial Z_{1u}}{\partial \varepsilon_{su}} \right) \cdot \mathbb{D}_{\varepsilon_{su}}^2;$$

$$\frac{\partial Z_{1u}}{\partial \varepsilon_{su}} = \frac{2 \cdot l_1}{\pi \cdot \sqrt{\bar{\varepsilon}_{su}}}$$

$\bar{\varepsilon}_{su}$ – среднее значение предельных равномерных относительных деформаций арматуры.

Определение характеристик при вероятностном методе расчёта

Математическое ожидание и дисперсия максимального перемещения узла над разрушенной колонной:

$$\bar{Z}_{\max} = \frac{32 \cdot l_1^2}{\pi^3 \cdot \bar{N}_{sd}}; \quad \overline{Z}_{\max}^2 = \left(\frac{\partial Z_{\max}}{\partial N_{sd}} \right) \cdot \overline{N}_{sd}^2$$

$$\frac{\partial Z_{\max}}{\partial N_{sd}} = \frac{32 \cdot l_1^2}{\pi^3 \cdot \bar{N}_{sd}}$$

Математическое ожидание и дисперсия растягивающих усилий в ригеле и плите перекрытия вдоль оси ОХ:

$$\bar{N}_{sd} = \bar{R}_{sd}^{(1)} \cdot A_{s1} + \bar{R}_{sd}^{(2)} \cdot A_{s2};$$

$$\overline{N}_{sd}^2 = \left(\frac{\partial N_{sd}}{\partial R_{sd}^{(1)}} \right)^2 \cdot \left(R_{sd}^{(1)} \right)^2 + \left(\frac{\partial N_{sd}}{\partial R_{sd}^{(2)}} \right)^2 \cdot \left(R_{sd}^{(2)} \right)^2;$$

$$\frac{\partial N_{sd}}{\partial R_{sd}^{(1)}} = A_{s1}; \quad \frac{\partial N_{sd}}{\partial R_{sd}^{(2)}} = A_{s2}$$

Математическое ожидание и дисперсия приведенной нагрузки на ригели и плиту перекрытия:

$$\bar{q}_0 = \bar{q}_1 + \bar{q}_2 \cdot \frac{l_2}{l_1} + \frac{2 \cdot \bar{q}_{nл} \cdot l_2}{\pi};$$

$$\overline{q}_0^2 = \left(\frac{\partial q_0}{\partial q_1} \right)^2 \cdot \overline{q}_1^2 + \left(\frac{\partial q_0}{\partial q_2} \right)^2 \cdot \overline{q}_2^2 + \left(\frac{\partial q_0}{\partial q_{nл}} \right)^2 \cdot \overline{q}_{nл}^2;$$

$$\frac{\partial q_0}{\partial q_1} = 1; \quad \frac{\partial q_0}{\partial q_2} = \frac{l_2}{l_1}; \quad \frac{\partial q_0}{\partial q_{nл}} = \frac{2 \cdot l_2}{\pi};$$

$$\bar{q}_1 = \bar{g}_1;$$

$$\overline{q}_1^2 = l^2 \cdot \overline{g}_1^2;$$

$$\bar{q}_2 = \bar{q}_1;$$

$$\overline{q}_2^2 = l^2 \cdot \overline{q}_1^2;$$

$$\bar{q}_{nл} = \bar{g}_{nл} + \bar{v}_{nл};$$

$$\overline{q}_{nл}^2 = l^2 \cdot \overline{g}_{nл}^2 + l^2 \cdot \overline{v}_{nл}^2$$

Результаты вероятностного расчёта

Показатели	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Предел текучести арматуры А400, МПа	435,73	21,8	0,050
Растягивающее усилие в ригеле и плите вдоль оси ОХ N_{sd} , кН	497,98	23,27	0,047
Предельное значение равномерных относительных деформаций арматуры δ_p	0,138	0,024	0,174
Предельная нагрузка, выдерживаемая ваннами (по принятой методике) q_{ud} , кН/м ²	37,93	3,55	0,094
Предельная нагрузка, выдерживаемая ваннами (по нормативной методике) q_{ud} , кН/м ²	37,93	3,79	0,100
Приведенная нагрузка на перекрытие q_0 , кН/м ²	22,82	2,51	0,110
Предельное расчётное значение прогиба над разрушенной колонной Z_{1u} , см	2,83	0,246	0,087

Примечание: количество стержней $n = 10$ шт.

Определение вероятности отказа

Показатели	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Предельная нагрузка, выдерживаемая ваннами (по принятой методике) q_{ud} , кН/м ²	37,93	3,55	0,094
Предельная нагрузка, выдерживаемая ваннами (по нормативной методике) q_{ud} , кН/м ²	37,93	3,79	0,100
Приведенная нагрузка на перекрытие q_0 , кН/м ²	Уровень надёжности: 22,82	Вероятность отказа: 2,51	0,110

$$\gamma = \frac{\bar{q}_{ud} - \bar{q}_0}{\sqrt{\sigma_{q_{ud}}^2 + \sigma_{q_0}^2}} \geq \gamma_n$$

$$P = 0,5 + \Phi(\gamma)$$

$$Q = 1 - P$$

Расчёт по принятой методике:

$$\gamma = \frac{37,93 - 22,82}{\sqrt{3,55^2 + 2,51^2}} = 3,49 > 3$$

$$\Phi(\gamma) = 0,4997505$$

$$P = 0,9997505; \quad Q = 0,0002495$$

Расчёт по нормативной методике:

$$\gamma = \frac{37,93 - 22,82}{\sqrt{3,79^2 + 2,51^2}} = 3,32 > 3$$

$$\Phi(\gamma) = 0,4995220$$

$$P = 0,9995220; \quad Q = 0,0004780$$

Вывод: при применении данной методики вероятность отказа снижается в среднем в 2 раза

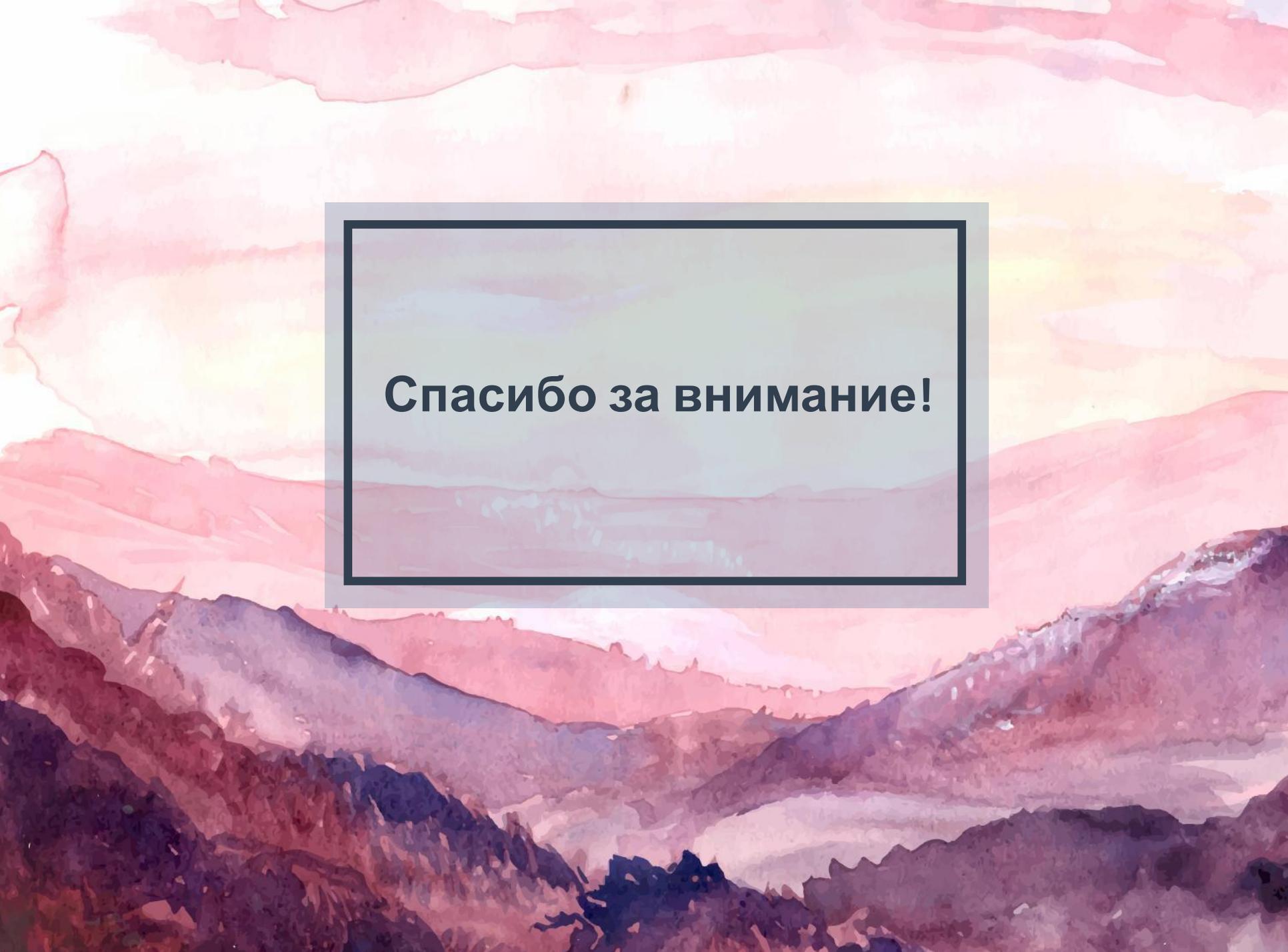
Научная новизна и практическая значимость результатов работы

Научная новизна:

- Определены вероятностные характеристики распределения равномерного относительного удлинения многостержневой арматуры в зависимости от числа стержней в опасном сечении.
- Предложен расчёт вероятности безопасной работы монолитного железобетонного перекрытия с многостержневой арматурой при аварийном разрушении нижележащей колонны.

Практическая значимость:

- Выявление резервов несущей способности железобетонных конструкций с многостержневым армированием.
- Повышение расчётных сопротивлений многостержневой арматуры на 5...10%, что позволяет снизить её расход.
- Повышение надёжности работы железобетонных конструкций с многостержневым армированием при аварийных воздействиях.

The background is a watercolor-style illustration of a mountainous landscape. The sky is filled with soft, blended washes of pink, peach, and light yellow, suggesting a sunrise or sunset. The mountains in the foreground and middle ground are rendered in various shades of purple, magenta, and deep red, with some areas appearing darker and more shadowed. The overall style is soft and artistic. A semi-transparent grey rectangular box with a thin black border is centered in the upper half of the image, containing the text.

Спасибо за внимание!