

**СТАТИСТИКА НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ  
ЗДАНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ РЕШЕТЧАТЫМИ  
ПОКРЫТИЯМИ ИЗ ТРУБ ТИПА "КИСЛОВОДСК". АНАЛИЗ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ МОНТАЖА**

УДК 624.02.87  
ГОУ ВПО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

**Филипович С.В.,  
Латыпов В.М.,  
Филипович С.С.**

Начиная с 1975 г., в СССР в строительстве широкое применение нашли пространственные структурные конструкции. Были построены заводы по серийному изготовлению пространственных решетчатых конструкций (ПРК) из прокатных профилей системы ЦНИИСК и труб системы "Мархи" и "Кисловодск" мощностью в общей сложности более чем на 2,5 млн. м<sup>2</sup> перекрываемой площади в год. По некоторым данным ежегодный ввод в эксплуатацию зданий типа "Кисловодск" составлял около 1,5 млн. м<sup>2</sup>. До 1985 года выпускались капитальные структурные плиты (СП) с неразрезной решеткой СП 30-400 под шифром проекта  $\frac{351}{02}00, 02$  (размеры в плане 30×30 м, расчетная нагрузка – 400 кг/м<sup>2</sup>).

С 1984 г. были разработаны и начато производство структурных секций типа "Кисловодск" марок СП 30-300 и СП 30-350А (шифр  $\frac{351}{02}03$ ).

Структурные плиты типа "Кисловодск" изготавливаются из круглых труб, имеют высоту 2,12 м. Соединение трубчатых элементов в узлах – комбинированное, в котором применяется сварка в заводских условиях, а сборка узла осуществляется на болтах.

В Республике Башкортостан (РБ) эксплуатируется около 300 зданий типа "Кисловодск", в т.ч. более 100 в АНК "Башнефть". С 1983 года начались обрушения зданий такого типа, первое обрушение произошло в 1983 году, последнее – в феврале 2000 года в г.Уфе. Начиная с 2001 года, было проведено комплексное техническое обследование около 100 модулей типа "Кисловодск". Разрабатывались проекты усиления.

Техническими решениями в проектах усиления предусматривалось устранение ошибок монтажа и эксплуатации зданий, причем некоторые решения по усилению предварительно прошли экспериментальную проверку, для чего был спроектирован и изготовлен специальный стенд.

В данной статье были проанализированы следующие причины аварий:

- выполнение кровли не по проекту;
- коррозия элементов ПРК;

– смещения верха колонн в результате неравномерных осадок и неточностей монтажа основных колонн.

Существуют также следующие дефекты и повреждения ПРК:

- непроектное исполнение узла сопряжения колонн фахверка с узлами верхнего пояса ПРК (по проекту верхний узел колонн фахверка имеет возможность перемещаться по вертикали с целью исключения передачи нагрузок от неравномерных осадок колонн);
- несоответствие фактической монтажной схемы проектной (стержни при сборке перепутаны или отсутствуют);
- отклонения геометрических параметров элементов структуры;
- замена в некоторых узлах болтового соединения с коннектором сварным.

Для оценки снижения несущей способности стержней из-за уменьшения площади сечений трубчатых элементов были проведены измерения остаточной толщины стенок труб. Измерения проводились с точностью 0,01 мм ультразвуковым толщиномером Т-МІКЕ EL™. На гистограммах приведены результаты измерений.

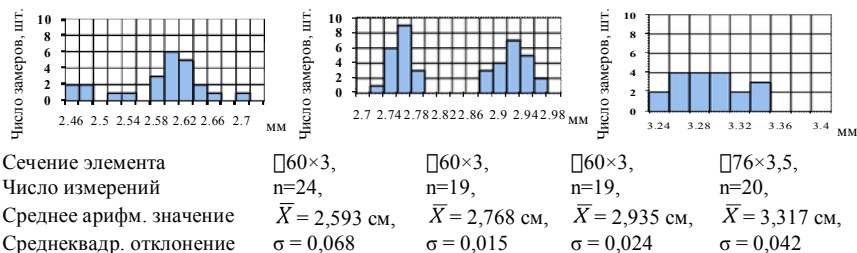


Рис. 1. Гистограмма толщины стенок корродированных стержней

В первом случае коррозия привела к снижению несущей способности стержня по сравнению с расчетным значением на 13,6%, во втором – 7,7%, в третьем – 2,1%, и для типоразмера □76×3,5 достигла 5,2%. При анализе НДС ПРК следует учитывать фактические площади сечений элементов.

Одной из главных причин изменения напряженно-деформированного состояния многократно статически неопределимых ПРК является неравномерность осадок колонн. В соответствии с инструкцией по монтажу ПРК отклонения верха основных колонн не должны превышать 1 см. При обследовании 92 модулей типа "Кисловодск" нивелированием измерялись отметки верха четырех основных колонн. Установлено, что усилия от неравномерности смещения верха колонн в элементах ПРК определяется не абсолютным отклонением верха колонн от горизонтальной плоскости, а расстоянием от верха одной из четырех ко-

лонн до плоскости (на рисунке заштрихована), проходящей через три точки по верху трех других колонн. Это отклонение условно обозначим  $\Delta_{эКВ}$ . На рис.2 приведена схема для определения  $\Delta_{эКВ}$  по результатам нивелировки отметок верха колонн.

$\Delta_{эКВ}$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{эКВ} = \Delta_4 - \Delta_1 - \Delta_3 + \Delta_2.$$

Пример определения эквивалентной осадки

$$\Delta_1 = 4,0 \text{ см}; \Delta_2 = 0,0 \text{ см}; \Delta_3 = 1,6 \text{ см}; \Delta_4 = 8,0 \text{ см}.$$

$$\Delta_{эКВ} = \Delta_4 - \Delta_1 - \Delta_3 + \Delta_2.$$

$$\Delta_{эКВ} = 8,0 - 4,0 - 1,6 + 0,0 = 2,4 \text{ см}.$$

По результатам обследования были определены  $\Delta_{эКВ}$  для 92-х модулей. На рис.3 приведена гистограмма  $\Delta_{эКВ}$  и найдено уравнение плавной кривой распределения  $\Delta_{эКВ}$ . Наиболее точное уравнение плавной кривой описывается логарифмическим нормальным законом распределения.

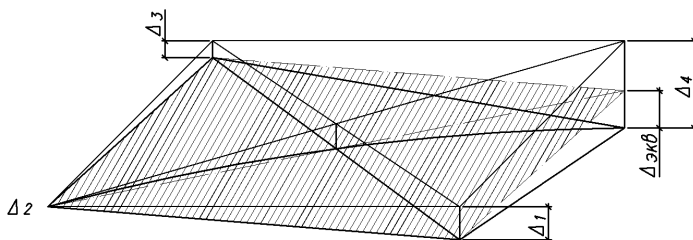


Рис.2. Определение эквивалентной осадки колонны  $\Delta_{эКВ}$

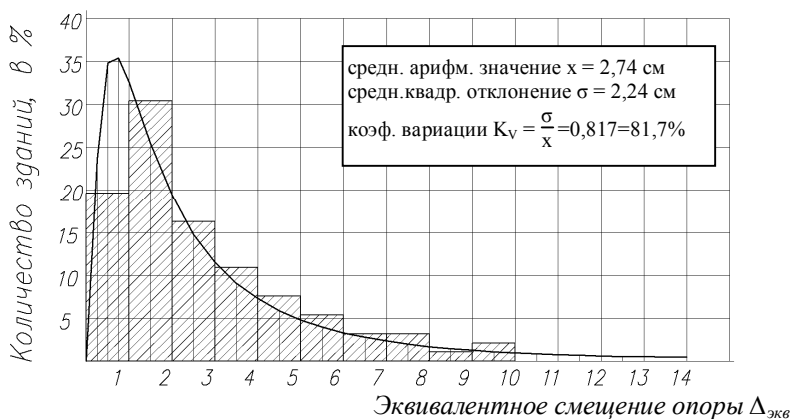


Рис.3. Гистограмма распределения эквивалентных осадок основных колонн по 92-м зданиям типа "Кисловодск"

Вид функции логарифмического распределения:

$$y = \frac{1}{x \cdot \sigma_z \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln(x_i) - \ln(x_0))^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right],$$

$$\text{где: } \ln(x_0) = \frac{\sum \ln(x_i)}{N}; \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum [\ln(x_i)]^2 - N \cdot [\ln(x_0)]^2}{N - 1}}.$$

В ПВК SCAD проведен анализ влияния эквивалентной осадки колонн на напряженно-деформированное состояние ПРК 30×400 из 816 стержней, результаты которых приведены в табл.4. Найдены усилия в элементах ПРК от смещения  $\Delta_{\text{эКВ}}=10$  см. Тогда на основании принципа суперпозиции для любого другого смещения  $\Delta_{\text{Ф}}$  конкретного модуля усилия в *i*-м стержне определяются по формуле

$$N_{i, \Delta\phi} = N_{i, \Delta 10} \frac{\Delta\phi}{\Delta 10},$$

где  $N_{i, \Delta 10}$  – усилие в *i*-м стержне от  $\Delta_{\text{эКВ}}=10$  см.

При обследовании для анализа напряженно-деформированного состояния ПРК важную роль имеет достоверность информации о нагрузках. Постоянные нагрузки определялись по результатам вскрытия кровли. Количество вскрытий варьировалось от 4 до 6.

На рис.4 приведена гистограмма постоянных расчетных нагрузок, найденных путем использования статистических характеристик веса слов кровли, профилированного настила, прогонов и т.д.

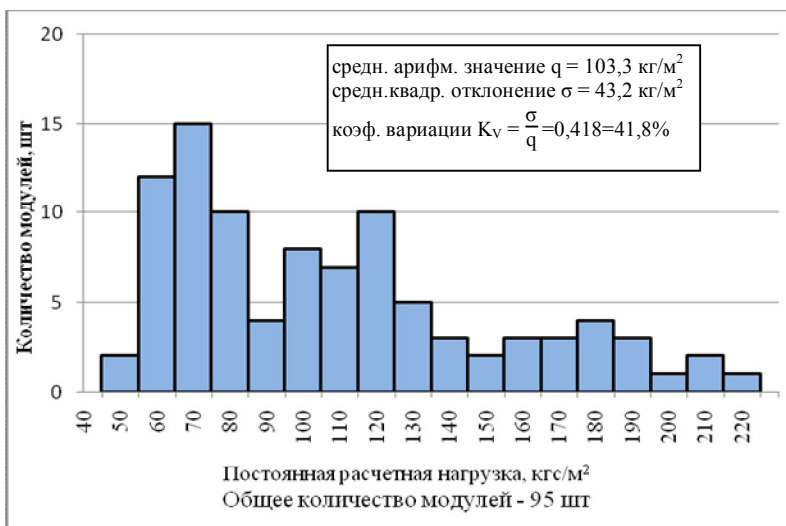


Рис.4. Гистограмма постоянных расчетных нагрузок

На рис.5-10 приведены схемы раскладок и нумерация стержней верхнего пояса (а), нижнего пояса (б), раскосной решетки (в) и капителей (г) для ПРК СП 30-400, СП 30-300 и СП 30-350А соответственно, а также приведены типы стержней.

В табл.1 приводится количество стержней каждого типа по верхнему и нижнему поясам, раскосной решетке и капителям для ПРК трех типов.

В табл.2 приведена несущая способность стержней семи типов, используемых в трех типах ПРК на растяжение и сжатие.

В табл.3-5 приведены результаты анализа НДС СП 30-400 от расчетной проектной нагрузки  $400 \text{ кг/м}^2$ ,  $\Delta_{\text{ЭКВ}} = 10 \text{ см}$  и совместного воздействия постоянной нагрузки и  $\Delta_{\text{ЭКВ}} = 10 \text{ см}$  соответственно.

В табл.6 и 7 приведены усилия в стержнях СП 30-300 в % от несущей способности от расчетной нагрузки  $300 \text{ кг/м}^2$  и совместного действия постоянной нагрузки и  $\Delta_{\text{ЭКВ}} = 10 \text{ см}$  соответственно.

В табл.8 и 9 приведены усилия в стержнях СП 30-350А в % от несущей способности от расчетной нагрузки  $350 \text{ кг/м}^2$  и совместного действия постоянной нагрузки и  $\Delta_{\text{ЭКВ}} = 10 \text{ см}$  соответственно.

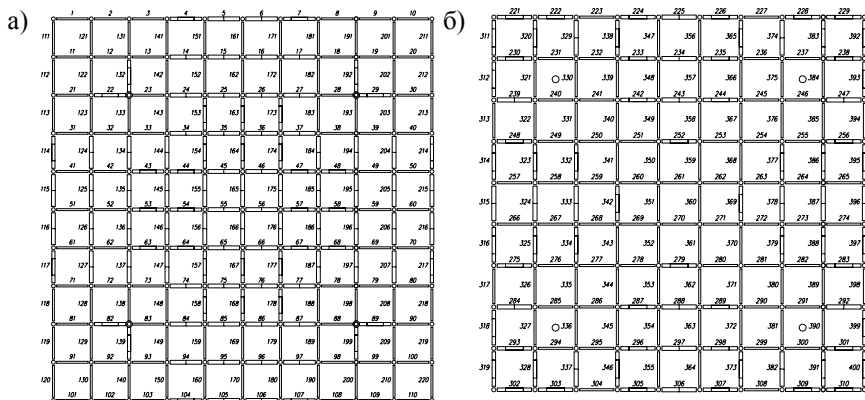


Рис.5. Схема раскладки и нумерация стержней верхнего (а)

и нижнего (б) поясов СП 30-400:

- — — — — Стержень I типа  $\phi 60 \times 3$
- ▬▬▬▬▬ Стержень II' типа  $\phi 76 \times 3,5$
- ▬▬▬▬▬ Стержень III типа  $\phi 102 \times 4$
- ▬▬▬▬▬ Стержень IV' типа  $\phi 127 \times 7$

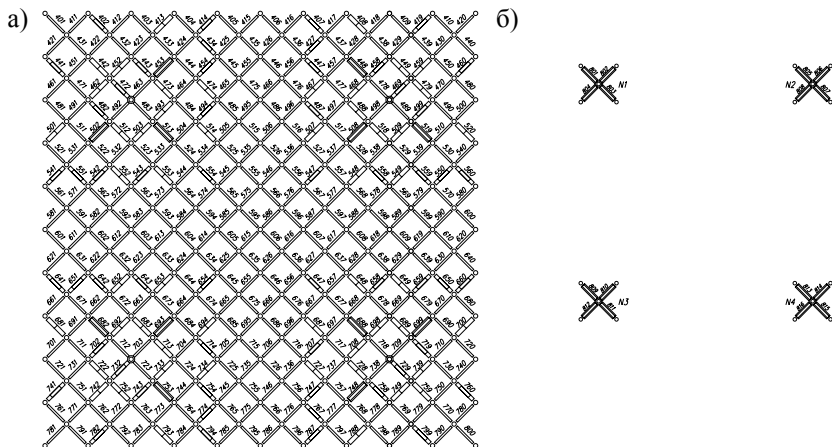


Рис. 6. Схема раскладки и нумерация стержней раскосной решетки (а) и капителей (б) поясов СП 30-400:

- — Стержень I типа  $\varnothing 60 \times 3$
- — Стержень II' типа  $\varnothing 76 \times 3,5$
- — Стержень III типа  $\varnothing 102 \times 4$
- — Стержень IV' типа  $\varnothing 127 \times 7$

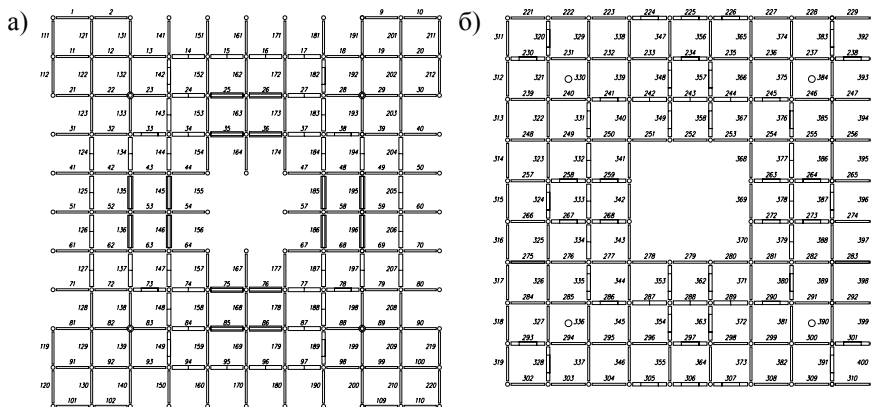


Рис. 7. Схема раскладки и нумерация стержней верхнего (а) и нижнего (б) поясов СП 30-300:

- — Стержень I типа  $\varnothing 60 \times 3$
- — Стержень II типа  $\varnothing 76 \times 3$
- — Стержень III типа  $\varnothing 102 \times 4$
- — Стержень IV типа  $\varnothing 114 \times 4,5$
- — Стержень V типа  $\varnothing 127 \times 5,5$

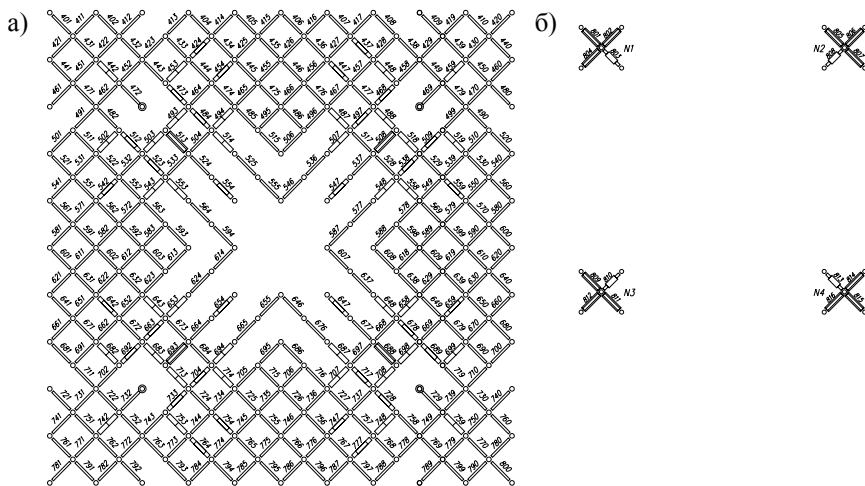


Рис. 8. Схема раскладки и нумерация стержней раскосной решетки (а)

и капителей (б) СП 30-300:

- Стержень I типа  $\phi 60 \times 3$
- Стержень II типа  $\phi 76 \times 3$
- Стержень III типа  $\phi 102 \times 4$
- Стержень IV типа  $\phi 114 \times 4,5$
- Стержень V типа  $\phi 127 \times 5,5$

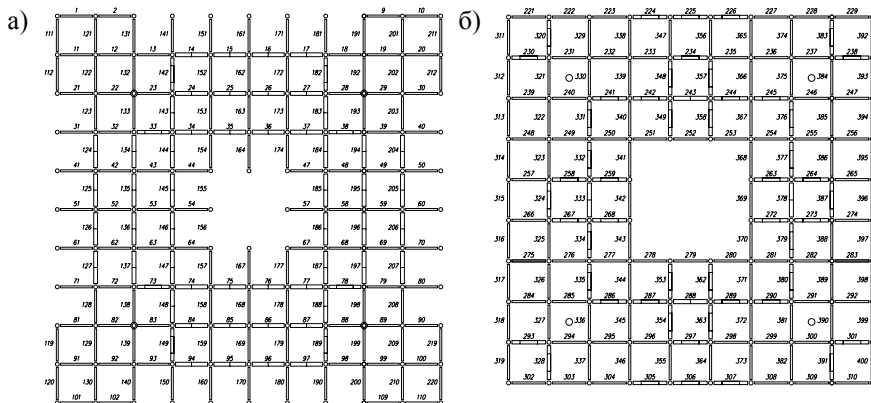


Рис. 9. Схема раскладки и нумерация стержней верхнего (а)

и нижнего (б) поясов СП 30-350А:

- Стержень I типа  $\phi 60 \times 3$
- Стержень II типа  $\phi 76 \times 3$
- Стержень III типа  $\phi 102 \times 4$
- Стержень IV типа  $\phi 114 \times 4,5$
- Стержень V типа  $\phi 127 \times 5,5$

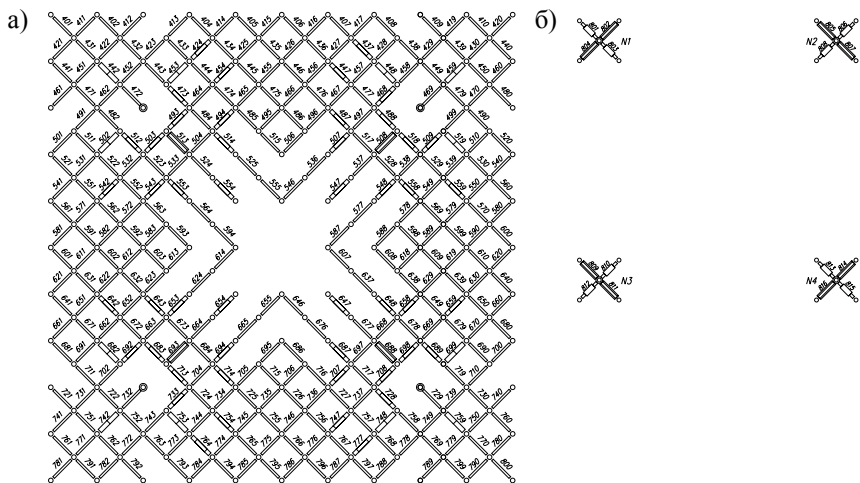


Рис. 10. Схема раскладки и нумерация стержневой раскосной решетки (а) и капителей (б) СП 30-350А:

- — Стержень I типа  $\varnothing 60 \times 3$
- — Стержень II типа  $\varnothing 76 \times 3$
- — Стержень III типа  $\varnothing 102 \times 4$
- — Стержень IV типа  $\varnothing 114 \times 4,5$
- — Стержень V типа  $\varnothing 127 \times 5,5$

Таблица 1

Состав ПРК типа "Кисловодск"

Элементы ПРК типа "Кисловодск"	Количество стержней, типов						
	I □60×3	II □76×3	III' □76×3,5	III □102×4	IV □114×4,5	IV' □127×7	V □127×5,5
СП30-400	492	—	156	140	—	128	—
Верхний пояс	112	—	40	68	—	0	—
Нижний пояс	100	—	60	20	—	0	—
Раскосы	280	—	56	52	—	12	—
Капители	0	—	0	0	—	16	—
СП30-300	510	102	—	68	16	—	4
Верхний пояс	124	8	—	52	0	—	0
Нижний пояс	114	60	—	4	0	—	0
Раскосы	272	44	—	12	4	—	0
Капители	0	0	—	0	12	—	4
СП30-350А	498	82	—	84	28	—	8
Верхний пояс	124	8	—	36	16	—	0
Нижний пояс	114	42	—	12	0	—	0
Раскосы	260	32	—	36	4	—	0
Капители	0	0	—	0	8	—	8



## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Таблица 2

Несущая способность стержней, тс

Несущая способность элемента	Типоразмеры сечений						
	I □60×3	II □76×3	II' □76×3,5	III □102×4	IV □114×4,5	IV' □127×7	V □127×5,5
Растяжение	12,4	15,8	16,7	28,3	35,6	60,7	48,3
Сжатие	-3,7	-7,3	-8,1	-18,6	-25,7	-42,9	-36,9

Таблица 3

Количество стержней ПРК СП30-400 с различным уровнем использования несущей способности в % от проектной нагрузки 400 кг/м<sup>2</sup>

Схема, элементы	Усилия в стержнях, % от несущей способности ("-" – сжатие, "+" – растяжение)											
	"-" >100	"-" 100-95	"-" 95-85	"-" 85-70	"-" 70-50	"-" 50-25	"-" 25-0	"+" 0-25	"+" 25-50	"+" 50-70	"+" 70-85	"+" 85-95
Верхний пояс	0	0	0	16	16	56	4	80	16	24	8	0
Нижний пояс	0	0	0	0	8	8	16	56	36	40	16	0
Раскосы	0	0	0	12	60	120	40	100	60	8	0	0
Капители	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
СП30-400	0	0	0	44	84	184	60	236	112	72	24	0
% от 816 эл.	0	0	0	5,4	10,3	22,6	7,4	28,9	13,7	8,8	2,9	0

Таблица 4

Количество стержней ПРК СП30-400 с различным уровнем усилий в % от несущей способности от эквивалентного смещения верха колонны №4  $\Delta_{Экв} = 10$  см

Элементы ПРК	Количество стержней, типов					
	Усилия в стержнях, % от несущей способности					
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50%
Верхний пояс	92	108	8	8	4	0
Нижний пояс	72	88	12	0	4	4
Решетка	30	296	56	16	2	0
Капители	0	16	0	0	0	0
Всего	194	508	76	24	10	4
в %	23,8	62,3	9,3	2,9	1,2	0,5

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Таблица 5

Количество стержней ПРК СПЗ0–400 с различным  
уровнем усилий в % от несущей способности  
от проектной нагрузки 400кг/м<sup>2</sup>  
и эквивалентного смещения верха колонны № 4  $\Delta_{э_{кв}} = 10$  см

Схема, элементы	Напряжение в стержнях, % от несущей способности											
	"-" >100	"-" 100-95	"-" 95-85	"-" 85-70	"-" 70-50	"-" 50-25	"-" 25-0	"+" 0-25	"+" 25-50	"+" 50-70	"+" 70-85	"+" 85-95
Верхний пояс	0	0	0	16	12	60	4	80	12	32	4	0
Нижний пояс	0	0	0	4	4	8	24	48	36	36	20	0
Раскосы	0	0	4	20	40	116	44	112	52	12	0	0
Капители	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0
СПЗ0-400	0	0	4	48	64	184	72	240	100			
% от 816 эл.	0	0	0,5	5,9	7,9	22,6	8,8	29,4	12,2			

Таблица 6

Количество стержней ПРК СПЗ0-300 с различным  
уровнем использования несущей способности  
в % от проектной нагрузки 300 кг/м<sup>2</sup>

Схема, элементы	Напряжение в стержнях, % от несущей способности											
	"-" >100	"-" 100-95	"-" 95-85	"-" 85-70	"-" 70-50	"-" 50-25	"-" 25-0	"+" 0-25	"+" 25-50	"+" 50-70	"+" 70-85	"+" 85-95
Верхний пояс	0	0	4	12	12	20	8	66	50	12	0	0
Нижний пояс	0	0	0	0	24	32	8	40	32	10	18	4
Раскосы	20	0	12	16	64	80	44	52	28	8	8	0
Капители	0	4	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
СПЗ0-300А	20	4	16	40	100	132	60	158	110	30	26	4
% от 700 эл.	2,9	0,6	2,2	5,7	14,3	18,8	8,6	22,6	15,7	4,3	3,7	0,6

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Таблица 7

Количество стержней ПРК СПЗ0–300 с различным  
уровнем усилий в % от несущей способности  
от проектной нагрузки 300 кг/м<sup>2</sup>  
и эквивалентного смещения верха колонны №4  $\Delta_{\text{эКВ}} = 10$  см

Схема, элементы	Напряжение в стержнях, % от несущей способности											
	"-" >100	"-" 100–95	"-" 95–85	"-" 85–70	"-" 70–50	"-" 50–25	"-" 25–0	"+" 0–25	"+" 25–50	"+" 50–70	"+" 70–85	"+" 85–95
Верхний пояс	0	0	4	12	12	22	4	70	44	16	0	0
Нижний пояс	0	0	0	2	20	36	8	30	40	12	16	4
Раскосы	16	6	14	26	48	78	38	64	28	12	2	2
Капители	2	0	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0
СПЗ0-300А	18	6	24	48	80	136	50	164	110	40	18	6
% от 700 эл.	2,6	0,9	3,4	6,9	11,4	19,4	7,1	23,4	15,7	5,7	2,6	0,9

Таблица 8

Количество стержней ПРК СПЗ0-350А с различным  
уровнем использования несущей способности  
в % от проектной нагрузки 350 кг/м<sup>2</sup>

Схема, элементы	Напряжение в стержнях, % от несущей способности											
	"-" >100	"-" 100–95	"-" 95–85	"-" 85–70	"-" 70–50	"-" 50–25	"-" 25–0	"+" 0–25	"+" 25–50	"+" 50–70	"+" 70–85	"+" 85–95
Верхний пояс	0	0	0	20	14	16	8	62	38	20	8	0
Нижний пояс	0	0	0	4	28	24	4	36	26	26	20	0
Раскосы	20	0	4	16	68	92	32	40	44	8	8	0
Капители	0	0	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0
СПЗ0-350А	20	0	16	44	108	132	44	138	108	54	36	0
% от 700 эл.	2,9	0	2,3	6,3	15,4	18,9	6,3	19,7	15,4	7,7	5,1	0

Таблица 9

Количество стержней ПРК СП30–350А с различным уровнем усилий  
в % от несущей способности от проектной нагрузки 350 кг/м<sup>2</sup>  
и эквивалентного смещения верха колонны №4  $\Delta_{\text{экр}} = 10$  см

Схема, элементы	Напряжение в стержнях, % от несущей способности											
	"-" >100	"-" 100-95	"-" 95-85	"-" 85-70	"-" 70-50	"-" 50-25	"-" 25-0	"+" 0-25	"+" 25-50	"+" 50-70	"+" 70-85	"+" 85-95
Верхний пояс	0	0	0	14	22	14	4	66	40	16	8	0
Нижний пояс	0	0	0	2	30	24	10	30	22	30	16	4
Раскосы	20	0	10	26	44	96	32	44	42	14	4	0
Капители	4	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
СП30-350А	24	0	18	46	96	134	46	140	104	60	28	4
% от 700 эл.	3,4	0	2,6	6,6	13,7	19,1	6,6	20,0	14,9	8,5	4,0	0,6

Анализ этих данных показывает, что ПРК СП 30-400 при отсутствии ошибок монтажа при проектной нагрузке, уровень использования несущей способности во всех стержнях (816) не превышает 85%, а 72,6% стержней загружены не более чем на 50%.

Для ПРК СП 30-300 65,7% стержней (из 700 элементов) при воздействии проектной постоянной нагрузки загружены не более чем на 50%, и для ПРК СП 30-350А при воздействии только постоянных нагрузок 60,3% стержней загружены не более чем на 50%.

Однако в этих двух типах ПРК, СП 30-300 и СП 30-350А, при воздействии только постоянных нагрузок и при отсутствии дефектов монтажа по 20 сжатых элементов раскосной решетки имеют усилия, превышающие несущую способность. С учетом постоянных нагрузок и изменения отметок верха колонн на  $\Delta_{\text{экр}} = 10$  см у ПРК СП 30-300 имеется 18 сжатых перенапряженных стержней элементов, а у ПРК СП 30-350А – 24 сжатых стержней перенапряжены.

Неравномерное смещение верха колонн на  $\Delta_{\text{экр}} = 10$  см часть стержней догружает, а часть стержней разгружает.

Для обеих структур СП 30-300 и СП 30-350А перегружены стержни, имеющие следующие номера (смотри рисунки 6 и 7): 449, 452, 462, 469, 472, 479, 487, 494, 543, 558, 643, 658, 707, 714, 722, 729, 732, 739, 749, 752.

Указанный последний вывод обусловлен тем, что при определении усилий в элементах ПРК в типовом проекте была принята расчетная схема без учета податливости основных колонн.