



**В.И. Римшин², Е.С. Кецо¹,
П.С. Трунцов², И.С. Кузина²,
Г.С. Быков¹**

¹ Научно-исследовательский институт
строительной физики,

² Московский государственный
строительный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье приведены расчеты усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра методом конечных элементов с созданием пространственной модели здания. Выполнены расчеты усиления плиты над колоннами, опорных участков балок перекрытия, металлических балок перекрытия и колонн по оси 2/И-Р и прогонов покрытия, переопирания бронестены на плиту и стену, устройства разгрузки ребристых плит и сборных ригелей, устройства конструкций стяжки пола 2-го этажа. Также плита и стяжка пола рассчитаны на нагрузки при дополнительных исходных данных. Расчеты моделей здания и его фрагментов реализованы с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9. Работа колонн моделировалась соответствующими стержневыми элементами. Работа металлических конструкций рамы моделировалась трех- и четырехузловыми пластинчатыми элементами. Работа металлопрокатных балок – стержневыми элементами. Плиты перекрытий представлены четырехузловыми пластинчатыми элементами.

Метод конечных элементов, усиление строительных конструкций, пространственные конструкции, стержневые и пластинчатые элементы.

Расчет усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра выполнен на основании результатов детально-инструментального обследования конструкций здания, осмотра и обследования конструкций, материалов и свойств грунтового основания. Общая конструктивная схема здания принята жесткой. Фундамент на естественном основании, с характеристиками, полученными в результате обследования. Все основные несущие конструкции запроектированы из монолитного железобетона и металлических рам. Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается совместной работой несущих рамных конструкций, объединенных связями и монолитным диском перекрытия. Расчет произведен в

соответствии с требованиями основных нормативных документов и сводами правил.

Статический расчет конструкций здания выполнен методом конечных элементов с созданием пространственной модели здания. Расчеты моделей здания и его фрагментов реализованы с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9. Конечно-элементная модель 2-х этажного корпуса содержит: 30 775 узлов и 32 395 элементов. При выполнении расчетов конечно-элементная модель рассматривалась как упругая [1].

Типы загружений.

Собственный вес конструкций. Сбор нагрузок представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сбор нагрузок

Материал	Формула подсчета/ нормативная нагрузка/кг	К _н по на- грузке	Расчетная нагрузка/кг	
			Суммар- ная	Суммарная расчетная на пролет
Конструкция подвесного потолка				
лист брони 6.3 мм	0,0063·7850=49.45	1.05	51.92	
лист стали 3 мм	0.003·7850=23.55	1.05	24.7	
лист резины 10 мм	0.01·1500=15	1.1	16.5	
гнутый швеллер 210x57x4 мм	15.72		15.72	
звукоизоляция 200 мм	0,2·45=9	1.2	10,8 кг/м ²	
итого:	112.72		119.64	861.4
* при расчете подвеса 12,5·4,2·1,05=55.1 кг вес уголка 100x8				
Нагрузка от кровельного пирога				
защитная ПВХ-мембрана	1.4	1.2	1.68	
геотекстиль	1		1	
пеноплекс 35	5,2	1.2	6.25	
минераловатные плиты РУФ БАТТС	5,75	1.2	6.9	
Профилированный настил Н114	15,6	1.1	17.16	
итого:	28.95		33	198
*вес прогонов учтен в ПК				

Материал	Формула подсчета/ нормативная нагрузка/ кг	К _н по нагрузке	Расчетная нагрузка/кг	
			Суммарная	Суммарная расчетная на пролет
Нагрузка на плиту после усиления полов				
керамзит 250 мм	0.25·800=200	1,3	260	
цементно-песчаная стяжка 100 мм	0.10·1800=180	1.2	216	
лист брони 6.3 мм	0.0063·7850=49.45	1.05	51.92	
грунтовка П-01	1.5		1.5	
резиновая плитка	48.06		48.06	
смесь резиновая крошка (2–3мм)+ клей Стандарт П-02	24.76		24.76	
окраска «Компаунд»	5		5	
итого:	459.32		607	

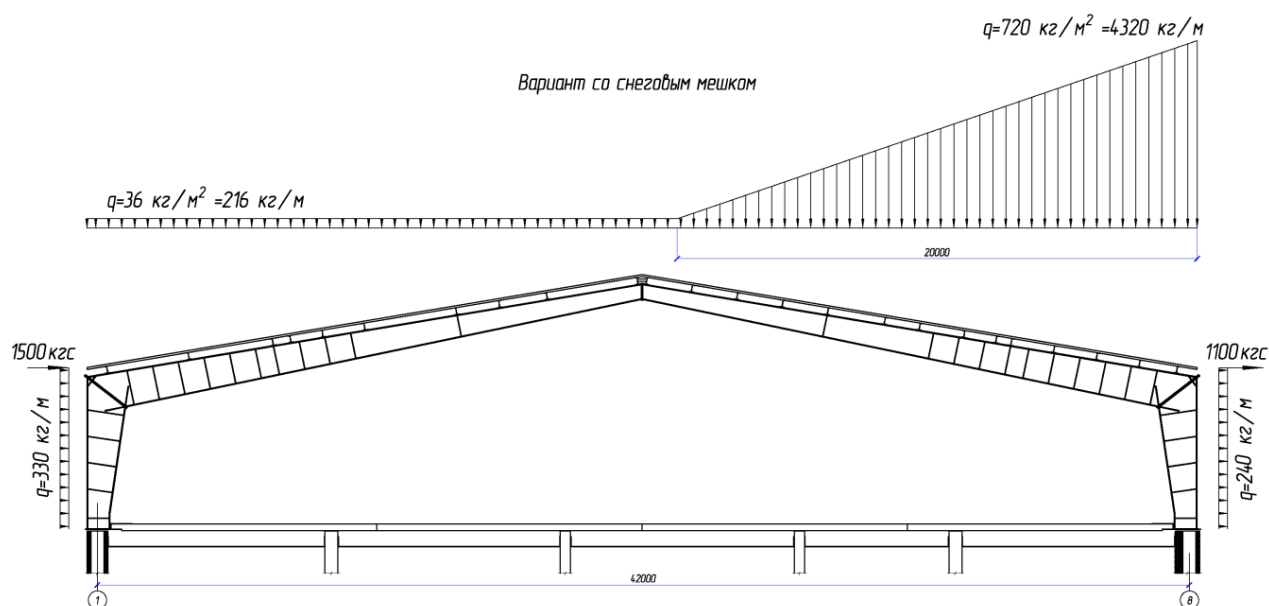


Рис. 1. Снеговая и ветровая нагрузка со снеговым мешком

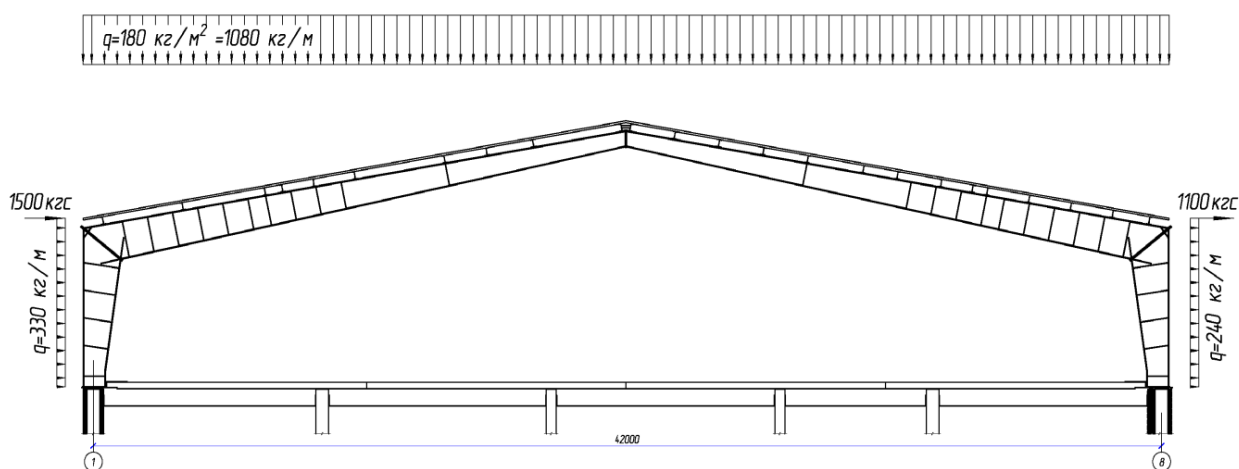


Рис. 2. Снеговая и ветровая нагрузка без снегового мешка

Расчетная нагрузка на 1 пог. м рамы от подвесного оборудования и мостков – 136.8 кг, нагрузка от конструкций стен из бронелистов принята как от подвесного потолка высотой 4 м, нагрузка от конструкций пулеуловителей принята по спецификациям раздела технической оснащенности с коэффициентом запаса 1.1 (320 кг/м²).

Временная нагрузка. Учет нагрузки от маневрирующих автомобилей весом 2100 кг и 3300 кг: 2100 кг – 500кг/м²·1.2=600 кг/м², 3300 кг – 700кг/м²·1.2=840 кг/м².

При расчете на продавливание добавляем вес машины $\frac{Q_t}{2} = \frac{2100 \cdot 1.2}{2} = 1260 \text{ кг/м}^2$ в серединах пролета на участке 100 мм·100 мм с удаленностью друг от друга на 1.8 м (рис. 3). Принимается нагрузка 840 кг/м², в которой уже присутствует временная нагрузка от людей. Суммарная расчетная нагрузка на плиту от веса полов и временной нагрузки – 1447 кг.

Снеговая нагрузка. Расчетный вес снегового покрова для III района 180 кг/м² с учетом снегового мешка в месте примыкания к кровле офисного здания на участке до 20 м увеличивается до 720 кг/м² (рис. 1 и 2). При расчете пола учитывались нагрузки, представленные на рисунке 3.

Для правильной работы узла стыковки колонны и плиты в местах опирания (рис. 4) применена схема усиления, представленная на рисунке 5. На основании произведенного расчета принимаем армирование по верхнему слою [2].

Суммарное армирование выполнено из арматурных стержней диаметром 20 мм и существующей 12 мм – $31,42 \text{ см}^2 + 5,65 \text{ см}^2 = 37,07 \text{ см}^2 > 34,50 \text{ см}^2$ (требуемая площадь армирования вдоль буквенных осей). Коэффициент использования составляет 93 %.

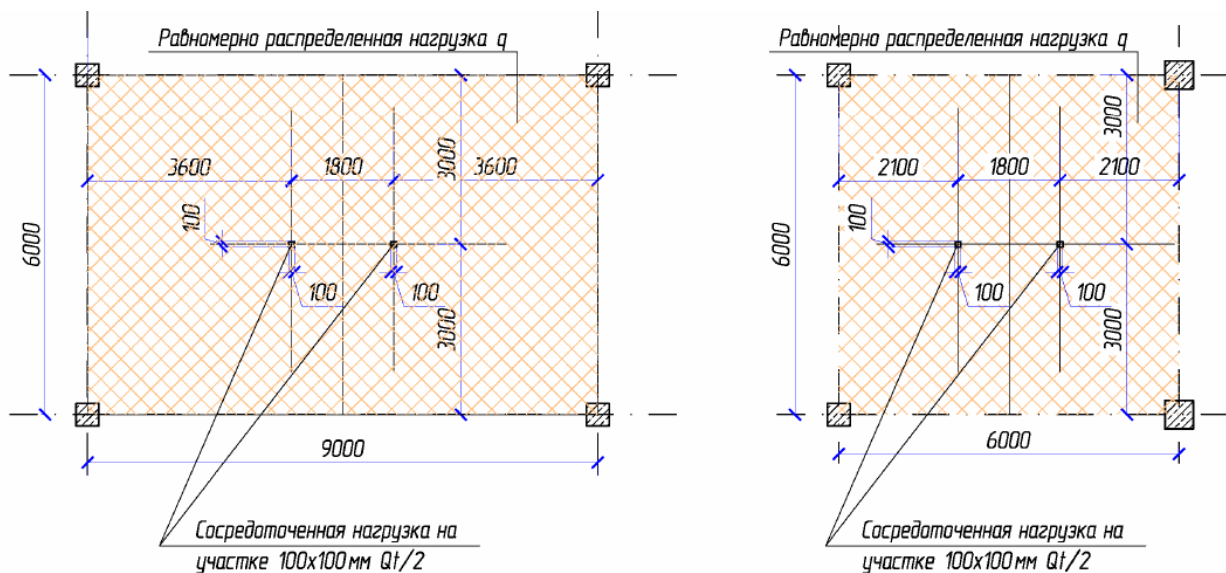


Рис. 3. Приложения нагрузки от автомобилей в различных пролетах при расчете на продавливание

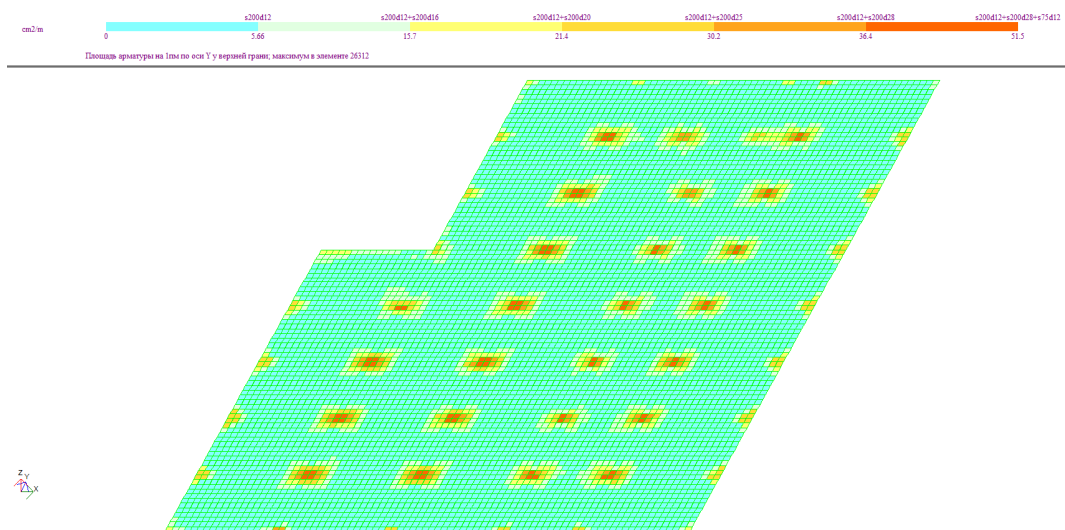


Рис. 4. Площадь арматуры по оси X, верхней грани. Приведенная арматура

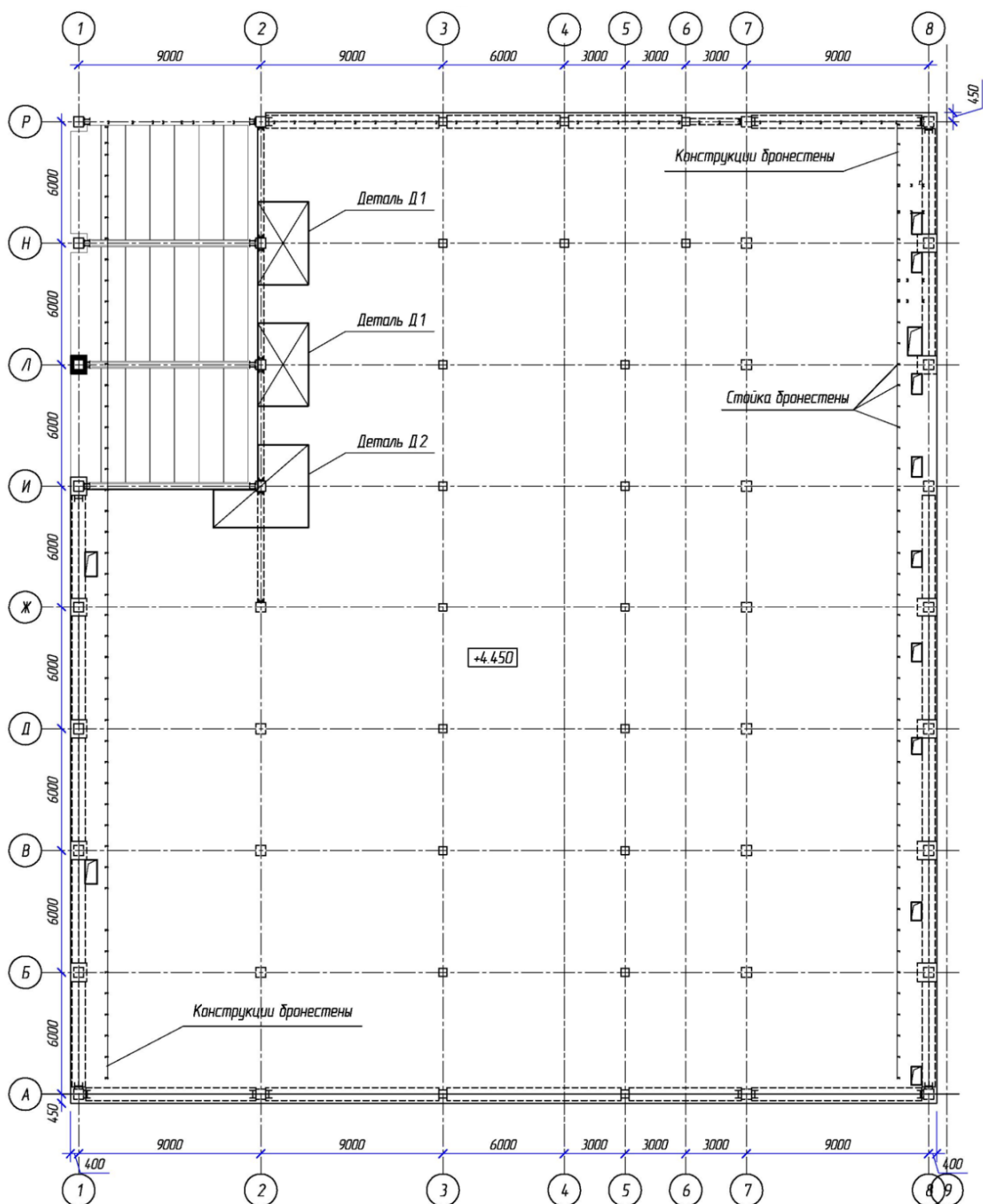


Рис. 5. Схема усиления опорных участков плиты

Деталь переопирания плиты на стену представлена на рисунке 6.

495,3 кг – вес конструкций бронестены. Расчетное усилие шва – 495,3 кг (4,95 кН). Определяем требуемую длину шва крепления:

$$l = \frac{4,95}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 15 \cdot 1} = 0,393 + 2,617 = 3 \text{ см} \quad -$$

(катет шва 6 мм) < 10 см.

Прочность крепления сварных швов переопирания бронестены обеспечена.

Для усиления данного участка принимаем схему разгрузки конструкций ребристых плит и ригелей, представленную на рисунке 7. В таблице 2 приведены предельные нагрузки при различных видах расчетных схем.

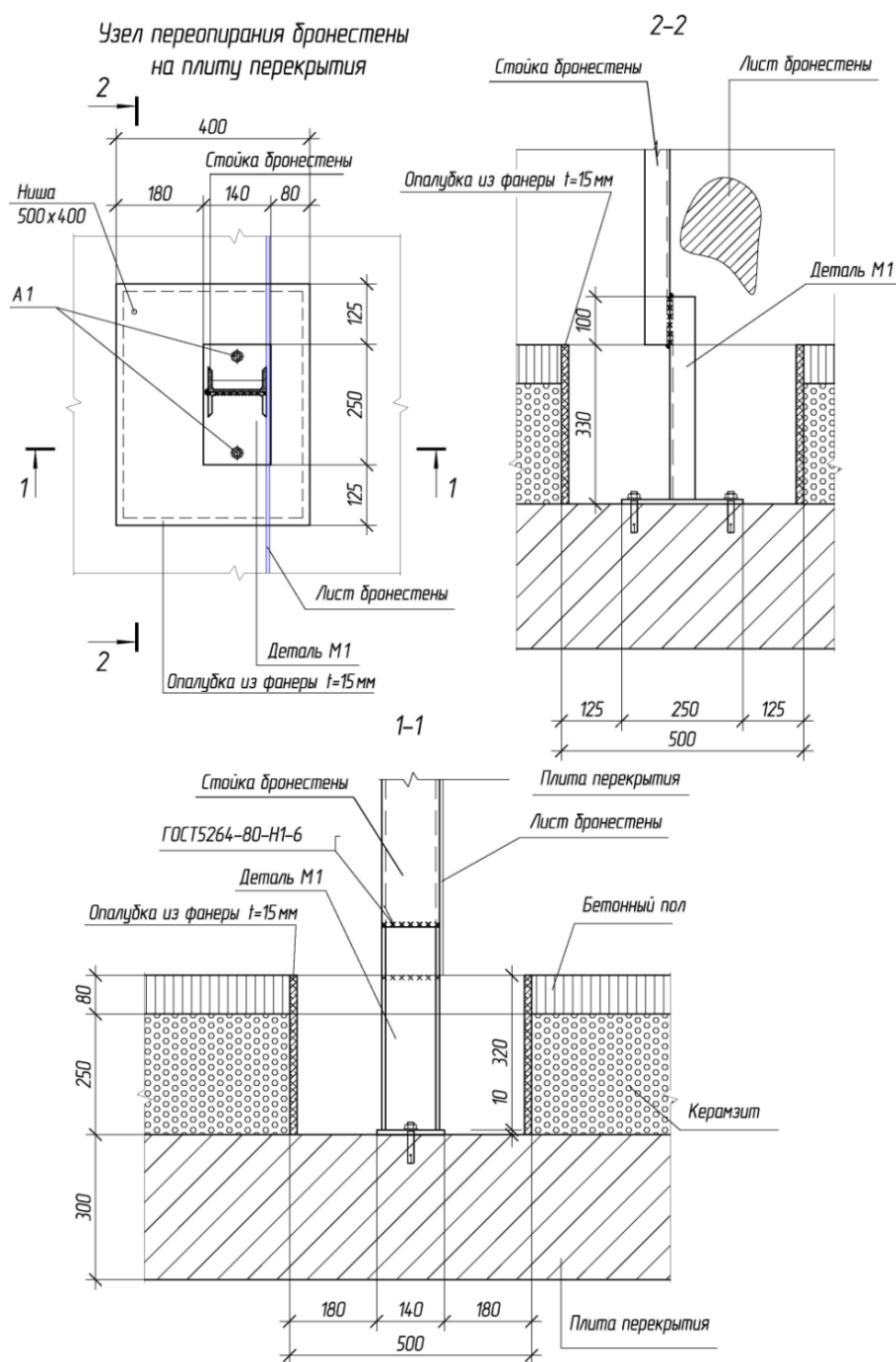
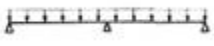
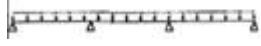


Рис. 6. Деталь переопирания плиты на стену

Таблица 2

Значения предельных нагрузок

Марка проф-настила	Шаг опор, м	Предельная нагрузка, кг/м ² , при расчетной схеме			
		Схема 1, с одним пролетом 	Схема 2, с двумя пролетами 	Схема 3, с тремя пролетами 	Схема 4, с четырьмя пролетами 
Н158-750-1,5	5,0	852	827	1005	Нет данных
	6,0	482	602	736	
	9,0	126	285	265	

По результатам расчета принимаем, что нижняя арматура имеет диаметр 32 мм, верхняя арматура – 18 мм. Производим подбор балки по оси 1 (рис. 8). Конструкция балки по оси 1 БМ1 принята из условий несущей способности по 2-м группам предельных состояний и по условиям опирания монолитной плиты перекрытия по профнастилу.

72

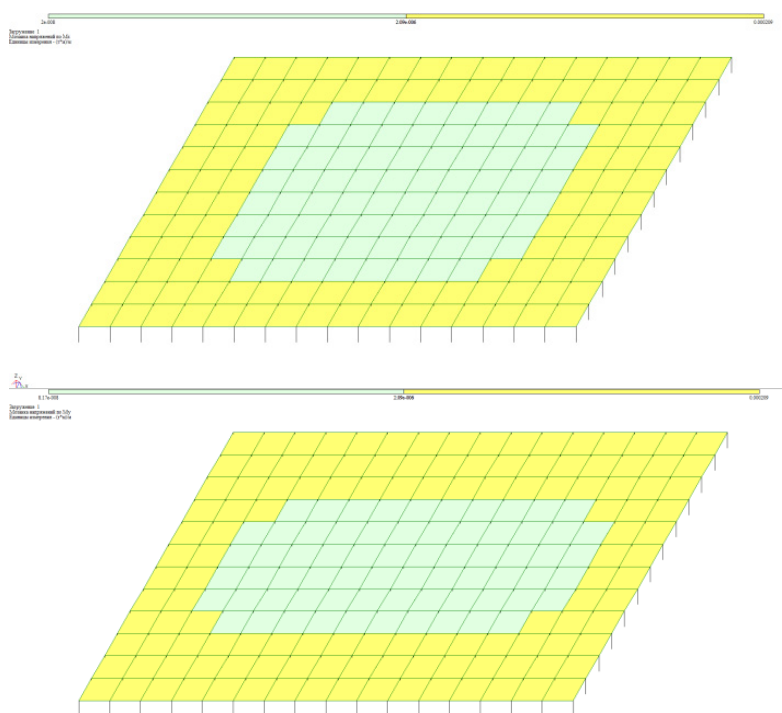


Рис. 9, 10. Эпюры моментов M_x и моментов M_y соответственно

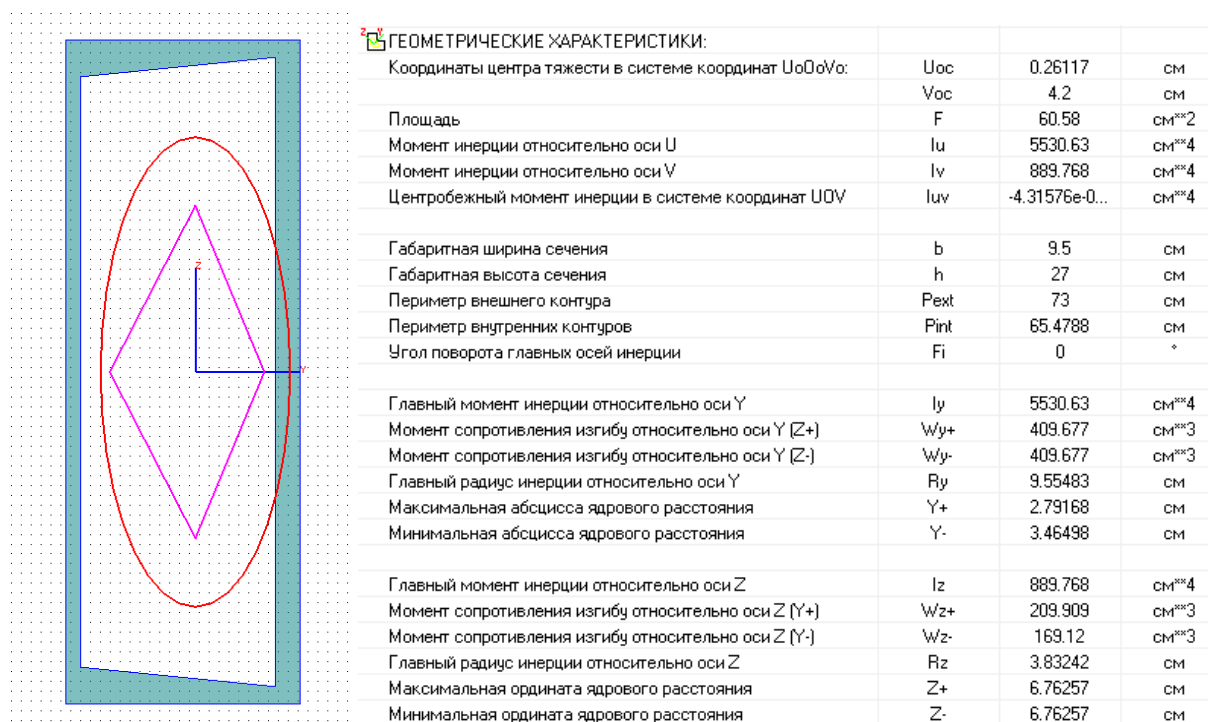


Рис. 11. Характеристики усиленного сечения прогонов

Характеристики усиленного сечения прогонов представлены на рисунке 11.

Максимальный пролет балки составляет $L=6$ м. Шаг балок покрытия составляет 1,67 м. Считаем балку на воздействие снегового мешка на расстоянии 1895 мм от края рамы в самом нагруженном месте. Нагрузка в данном случае составляет 655 кг/м^2 с учетом снегового мешка. 33 кг/м^2 – вес кровельного пирога. Грузовая площадь:

$$S = 6 \cdot 1.67 = 10.02 \text{ м}^2,$$

$$q = (655 + 33) \cdot 1.67 + 47.3 = 1196.26 \text{ кг/м}.$$

Швеллер № 27У с усилением пластиной с $W_x=409 \text{ см}^3$ $W_y=209 \text{ см}^3$. Расчетный изгибающий момент и поперечная сила:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{11.96 \cdot 6^2}{8} = 53.82 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$Q_{\max} = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{11.96 \cdot 6}{2} = 35.88 \text{ кН}.$$

Уклон кровли составляет 10 градусов. Проверим балку на изгиб в двух плоскостях:

$$M_x = 53.82 \cdot \cos 80 = 9.34 \text{ кН} / \text{м},$$

$$M_y = 53.82 \cdot \cos 10 = 53.00 \text{ кН} / \text{м},$$

$$\frac{934}{209} + \frac{5300}{409} = 17.42 \text{ кН} / \text{см}^2 < 24 \cdot 0.9 = 21.6 \text{ кН} / \text{см}^2,$$

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} = R_y \gamma_c,$$

где R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести. Коэффициент использования составляет 81 %.

Схема усиления опорных участков балок перекрытия приведена на рисунке 12. Проверим прочность шва крепления уголков обвязки колонны к уголкам обвязки оголовка по формуле:

$$\sigma_w = \frac{N_{cm}}{I_w \cdot K_f} = \frac{2460}{24 \cdot 0.6} = 170.8 < 174.8 \text{ МПа}.$$

Проверяем прочность шва крепления уголков обвязки колонны к уголкам за вычетом анкерного крепления $65,7 \cdot 4 = 262,8 \text{ кН}$ обвязки оголовка по формуле:

$$\sigma_w = \frac{N_{cm}}{I_w \cdot K_f} = \frac{2197,2}{24 \cdot 0.6} = 152.6 < 174.8 \text{ МПа}.$$

Коэффициент использования составляет 87,2 %.

С учетом усиления конструкций перекрытия и нехватки несущей способности по результатам обследования доводим сечения балок колонн и перекрытий до требуемых значений с учетом конструктивных особенностей. На рисунке 13 представлена схема усиления колонн и балок. На рисунках 14 и 15 приведены геометрические характеристики усиленной балки и колонн по оси 2/И-Р [4].

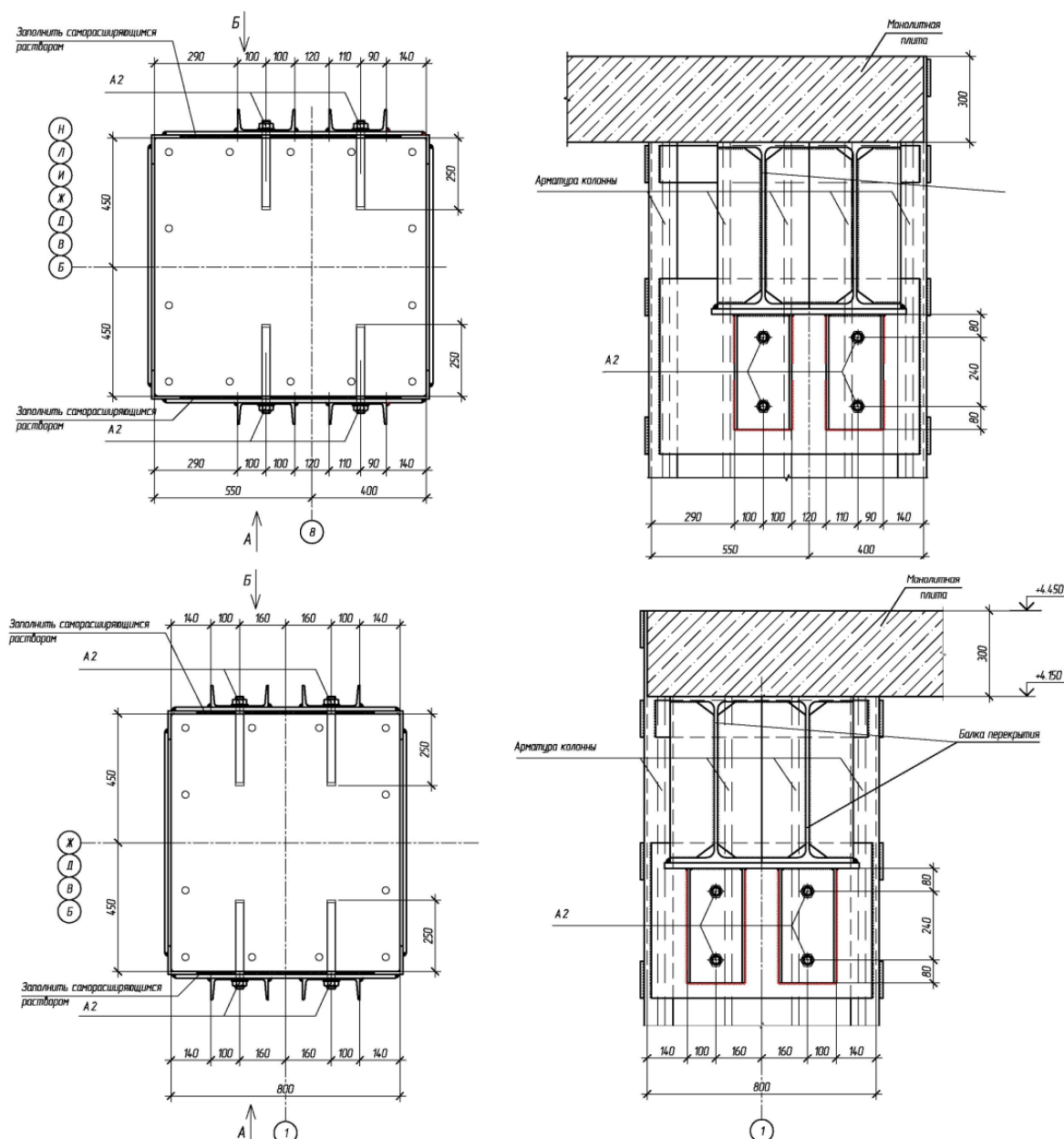


Рис. 12. Схема усиления опорных участков

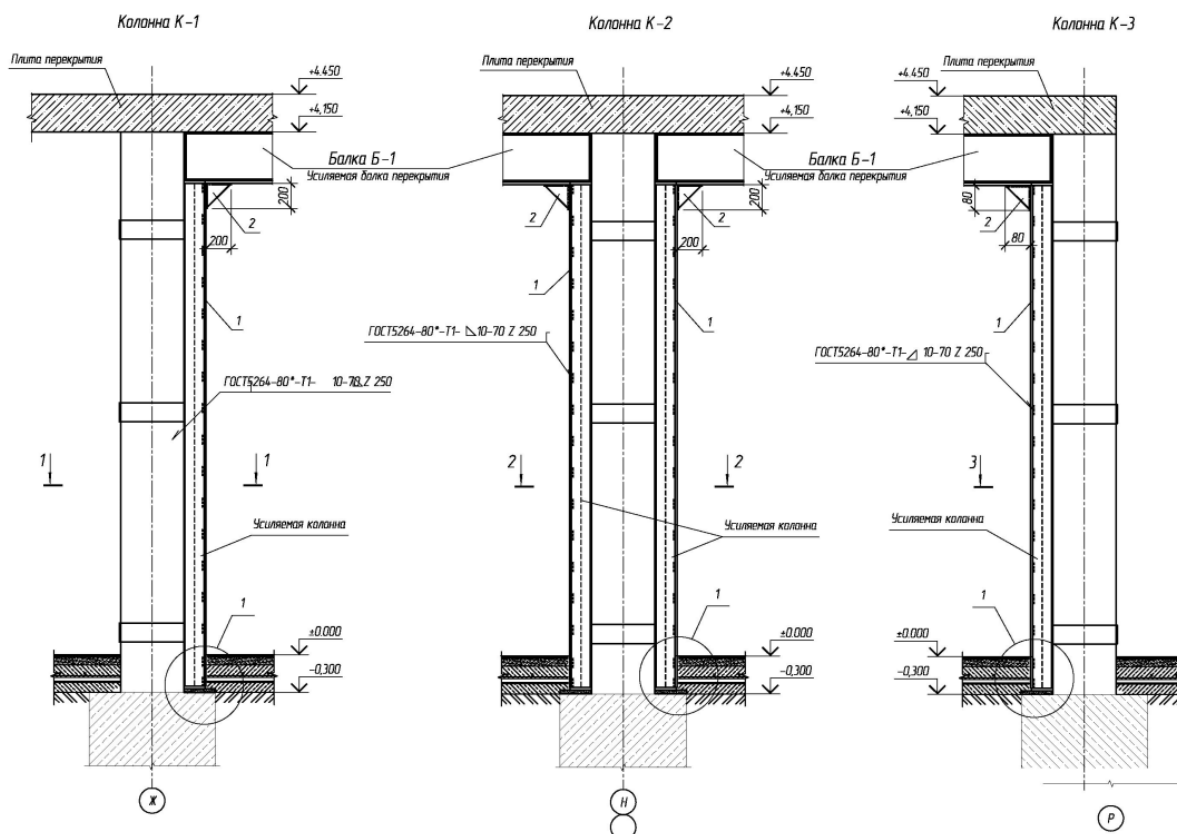


Рис. 13. Схемы усиления колонн и балок

 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:			
Координаты центра тяжести в системе координат $U_0O_0V_0$:	U_{oc}	13.8	см
	V_{oc}	11.0998	см
Площадь	F	189.9	см ²
Момент инерции относительно оси U	I_u	51667	см ⁴
Момент инерции относительно оси V	I_v	14056.1	см ⁴
Центробежный момент инерции в системе координат UOV	I_{uv}	-0.000140625	см ⁴
Габаритная ширина сечения	b	36	см
Габаритная высота сечения	h	40.79	см
Периметр внешнего контура	P_{ext}	211.68	см
Периметр внутренних контуров	P_{int}	0	см
Угол поворота главных осей инерции	F_i	0	°
Главный момент инерции относительно оси Y	I_y	51667	см ⁴
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z^+)	W_{y+}	1906.52	см ³
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z^-)	W_{y-}	3774.11	см ³
Главный радиус инерции относительно оси Y	R_y	16.4947	см
Максимальная абсцисса ядрового расстояния	Y^+	4.11213	см
Минимальная абсцисса ядрового расстояния	Y^-	4.11213	см
Главный момент инерции относительно оси Z	I_z	14056.1	см ⁴
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y^+)	W_{z+}	780.893	см ³
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y^-)	W_{z-}	780.893	см ³
Главный радиус инерции относительно оси Z	R_z	8.60339	см
Максимальная ордината ядрового расстояния	Z^+	19.8742	см
Минимальная ордината ядрового расстояния	Z^-	10.0396	см

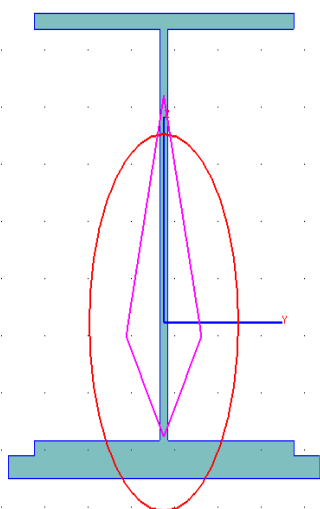


Рис. 14. Геометрические характеристики усиленной балки

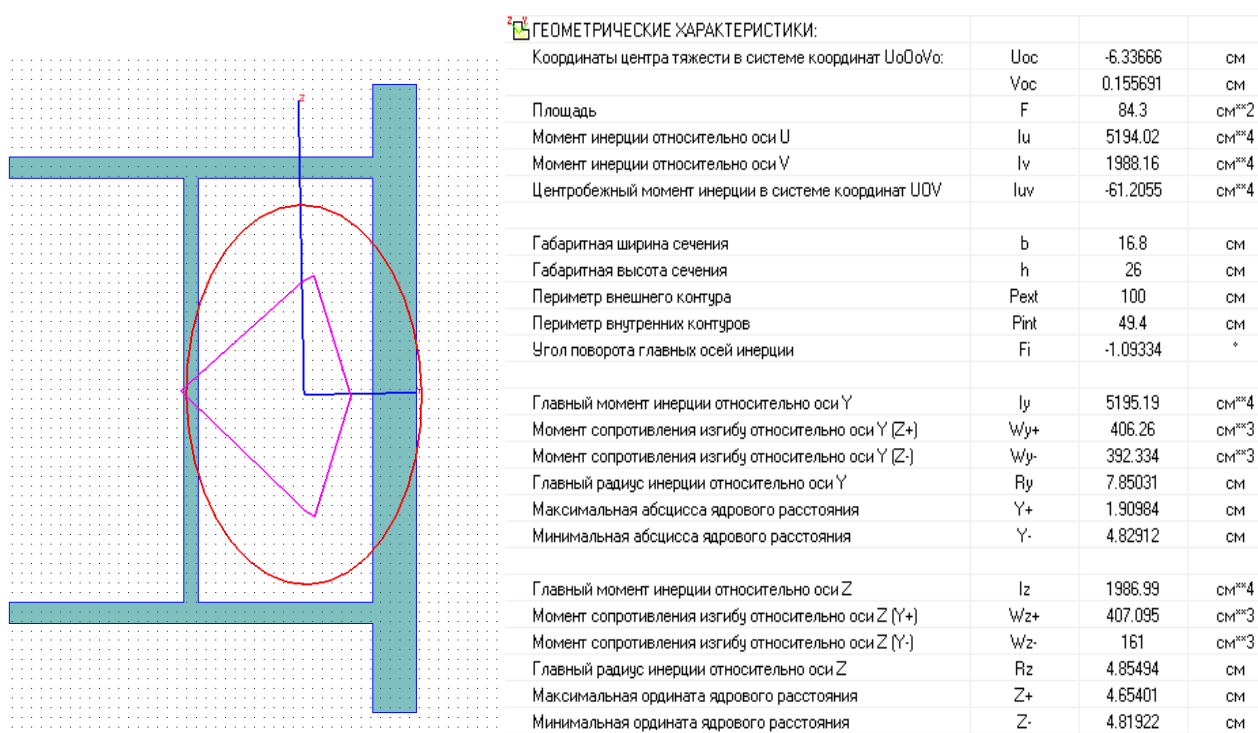


Рис. 15. Геометрические характеристики усиленной колонны

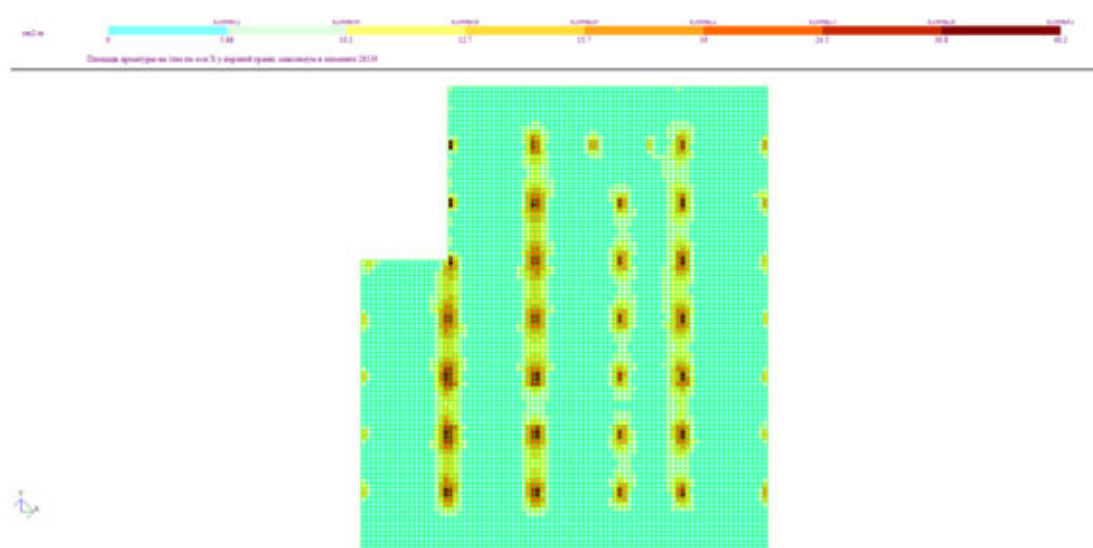


Рис. 16. Арматура по оси X_y верхней грани сечения

Металлическая колонна и металлическая балка после усиления имеют значения характеристик, влияющих на действие моментов, поперечных и продольных сил большие, чем при подборе, сделанном в отчете. Коэффициент использования после усиления при расчете по 2-м группам предельных состояний для колонны и ригеля составляет 83–90 %.

На рисунке 16 приведена схема армирования по оси X у верхней грани сечения.

При расчете нагрузка на плиту принималась согласно новым исходным данным. Для расчета плиты перекрытия принималась расчетная нагрузка от автомобиля в качестве распределенной нагрузки 840 кг/м² в габаритных размерах автомобиля 2.5х5.5 метров. Предусмотрено, что маневрирование автомобиля с

пассажирами в помещении тира происходит в осях А-Н/1-8 (где местами в серединах пролета прикладывалась нагрузка 840 кг/м² и временную технологическую расчетную нагрузку 130 кг/м²). Одновременное нахождение людей в зоне осей Н-Р/1-8 загружалось расчетной нагрузкой 400 кг/м². В технологическом пространстве между бронестеной и наружными стенами принималась эксплуатационная расчетная нагрузка 200 кг/м², как для служебных помещений. Нагрузка от конструкции полов принята в соответствии с фактическим весом материалов после усиления. Проверяем верхнее армирование. Суммарное армирование из стержней диаметром 20 мм, которые использовались для обрамления отверстий, составит

$$12,57 \text{ см}^2 + 5,655 \text{ см}^2 = 18,225 \text{ см}^2 > 15,49 \text{ см}^2.$$

Коэффициент использования составляет 84 %.

При расчете армирования пола принималась нагрузка в виде четырех площадок размером 0.28x0.28 м. Центры площадок расположены в форме прямоугольника со сторонами 1.65x2.85 м. Нагрузка на каждую из площадок принималась $900 \cdot 1,2 = 1080 \text{ кг}$.

Конечно-элементная схема в обоих случаях приводилась к созданию элементов с размерами 28x28 см, расположенных по краям четырехугольника со сторонами 1.65x2.85 м. В первом приближении керамзит моделируем стержнями. Согласно варианту 2 выполняем расчет пола в пространстве, принимаем модуль упругости керамзита $90\,000 \text{ кг/см}^2$, что фактически является средним из минимальных значений. Сам керамзит моделируем стержнями (вариант 1). Вариант 2 – просчитываем пол по керамзиту как на естественном основании, принимая коэффициенты постели от 1500 до 5000 т/м^3 . Также из нагрузки на пол убираем вес керамзита и вес монолитного пола. Их веса учитываются программным комплексом. Бетон класса В20.

В обоих случаях армирование карты не превышает выбранного армирования.

В статье были выполнены расчеты усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра методом конечных элементов с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9 с созданием пространственной модели здания, а именно расчеты усиления плиты над колоннами, опорных участков балок перекрытия, металлических балок перекрытия и колонн по оси 2/И-Р и прогонов покрытия, переопирания бронестены на плиту и стену, устройства разгрузки ребристых плит и сборных ригелей, устройства конструкций стяжки пола 2-го этажа. Также плита и стяжка пола

рассчитаны на нагрузки при дополнительных исходных данных. По результатам расчетов установлено, что принятые решения по усилению строительных конструкций верны и достаточны для безопасной эксплуатации здания. Коэффициенты использования не превышают предельно допустимого значения [5].

Литература

1. Трунтов, П. С. Усиление конструкций перекрытий спортивного комплекса в период реконструкции / П. С. Трунтов, В. И. Римшин // Молодежные инновации : сборник материалов семинара молодых ученых в рамках XXIII Международной научной конференции. – Москва, 2020. – С. 153–157.
2. Кришан, А. Л. Прочность сжатых железобетонных элементов со спиральным армированием / А. Л. Кришан // Архитектура. Строительство. Образование. – 2020. – № 1 (15). – С. 15–21.
3. Меркулов, С. И. Увеличение несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций усилением внешним армированием композитным материалом / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 2 (1002). – С. 56–57.
4. Курбатов, В. Л. Каталог архитектурно-строительных решений: виды, материалы, конструкции : учебное пособие / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин – Белгород, 2018. – 267 с.
5. Ерофеев, В. Т. Методы обработки экспериментальных данных / В. Т. Ерофеев, И. Н. Максимова, В. В. Афонин ; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Саранск, 2019.

V.I. Rimshin², E.S. Ketsko¹, P.S. Truntov², I.S. Kuzina², G.S. Bykov¹

¹ *Research Institute for Building Physics of Russian Academy of the Architecture and Construction Sciences*

² *Federal state budget educational of higher education «National research Moscow state university of civil engineering» (NRU MGSU)*

RESULTS OF CALCULATION OF BUILDING CONSTRUCTIONS STRENGTHENING USING FINITE ELEMENT METHOD

The article presents calculations of building structures strengthening in a 2-storey business center building using finite element method with a building spatial model creation. Calculations on strengthening of the slab over the columns, supporting sections of floor beams, metal floor beams and columns along the 2 / I-R axis and covering girders, re-supporting the armor wall on the slab and floors are performed. Also, slab and floor screed are designed for loads with additional initial data. Calculations of building models and its fragments were carried out using the licensed software package LIRA 9.6 R9 program. The columns work was modelled with corresponding bar elements. The metal frame structures work was modelled by three- and four-nodal plate elements. The rolled metal beams work was modelled with corresponding bar elements. Floor slabs are represented by four-nodal plate elements.

Finite element method, building structures strengthening, spatial structures, rod and plate elements.