

Н. С. Быстров, Н. В. Губа и пр.

Уральский Государственный Университет Путей Сообщения, Екатеринбург, Россия;

Некоторые результаты анализа работы большепролетных ферм при прогрессирующем разрушении

Аннотация. В данной научной работе проводится анализ работы большепролетных ферм призматической конфигурации [1]. Большепролетные покрытия современных промышленных зданий, а также таких крупных общественных зданий, как спортивные залы, дворцы спорта, здания современных супер- и гипермаркетов, могут проектироваться как большепролетные плоскостные или пространственные конструкции. Они различаются по характеру своей статической работы. В пространственных конструкциях все или большинство элементов работают совместно в двух направлениях. Благодаря такой совместной работе повышаются жесткость и несущая способность конструкции. При загрузке конструкции эксплуатационной нагрузкой были произведены статический и конструктивные расчеты. В результате подобраны сечения стержней фермы. Основная задача исследования состоит в том, чтобы проверить конструкцию пространственной фермы на живучесть и каскадное разрушение. Живучесть (жизнестойкость) конструкции – это свойство в течение некоторого времени сохранять несущую способность при локальных разрушениях (при аварийных ситуациях), вызванных природными и технологическими воздействиями. А именно стойкость конструкции (здания и сооружения) к прогрессирующему разрушению при запроектированных аварийных повреждениях и локальных разрушениях. Аварийное воздействие – это всегда локальное повреждение. Прогрессирующее разрушение (или лавинообразное) – это последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей[7].

Ключевые слова: Большепролетная ферма, аварийное разрушение, живучесть конструкции, расчетная схема.

1. Введение

Проблема обеспечения живучести сооружений в чрезвычайных ситуациях изучается давно [2] и по сегодняшний день остается актуальной. Серьезные исследования проводятся примерно с 1990 г. В результате которых предложены рекомендации для проектирования.

Рекомендации к проектированию, в частности, при выполнении расчетов[3-6]:

- аварийные воздействия принимать в виде стартовых локальных повреждений конструкции, для которых определены рекомендуемые ограничения;
- расчет выполнять на нормативные длительные нагрузки;
- расчет выполнять по первой категории предельных состояний, допуская большие перемещения и трещины, которые могут привести к потере эксплуатационных качеств, не нарушив при этом несущую способность конструкции;
- предпочтительны конструктивные решения, повышающие степень «неразрезности» и статической неопределимости системы здания;
- конструктивные элементы и узлы не должны быть подвержены хрупкому разрушению;
- необходимо выявить ключевые несущие элементы конструкции, выход из строя которых влечет лавинообразное обрушение сооружения;
- обеспечить способность ключевых элементов воспринимать аварийные воздействия без разрушения.

Данные рекомендации указывают на то, чтобы в результате возможных больших перемещений конструкции дать возможность приспособиться к новой ситуации, изменив в некоторых случаях схему своей работы под нагрузкой.

Обоснование способности, расчетом конструкции противостоять прогрессирующему разрушению, исключить моделирование процесса «прогрессирующего» разрушения конструкции на основе линейно-упругого статического расчета. Применять наиболее точный нелинейный динамический расчет конструкции [7].

Расчет считается завершенным, когда локализуется источник процесса разрушения, либо полным разрушением несущей системы. Отметим, что в большинстве случаев для предотвращения «прогрессирующего» разрушения конструкции необходимо обеспечить несущую способность всех элементов при начальных аварийных повреждениях.

2. Основная часть.

Исходные данные.

1 вид фермы:

На прогрессирующее разрушение исследовалась стальная призматическая ферма (рис.1). Ферма представляет собой пространственную стержневую конструкцию, пролетом 48 м, высотой 4.25 м. Узлы фермы – шарнирные. Опираение фермы назначено шарнирно неподвижное. Стержни выполнены из электросварных труб круглого сечения, сталь С345 по ГОСТ 27772-88. Нагрузка, согласно исходным данным узловая, приложена к нижнему поясу поясу, интенсивностью:

$F_{\text{снеговая}} = 16,61 \text{ кН}$

$F_{\text{постоянная}} = 4,86 \text{ кН}$

Ход работы.

1 этап:

-Моделирование расчётной схемы в ПК ЛИРА САПР (рис.1).

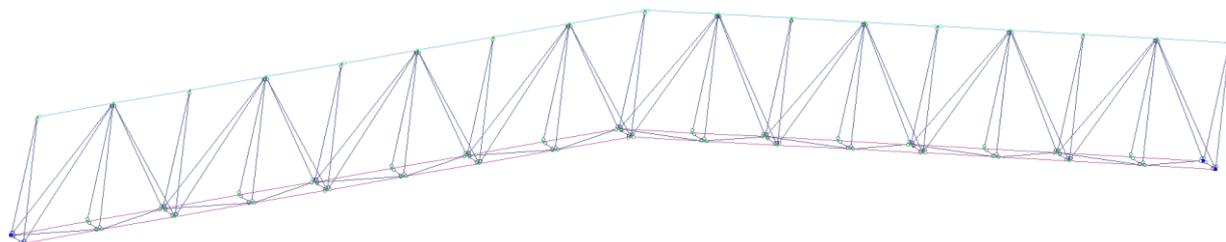


Рисунок 1 – схема фермы.

- Загрузка конструкции эксплуатационной нагрузкой (рис.2).

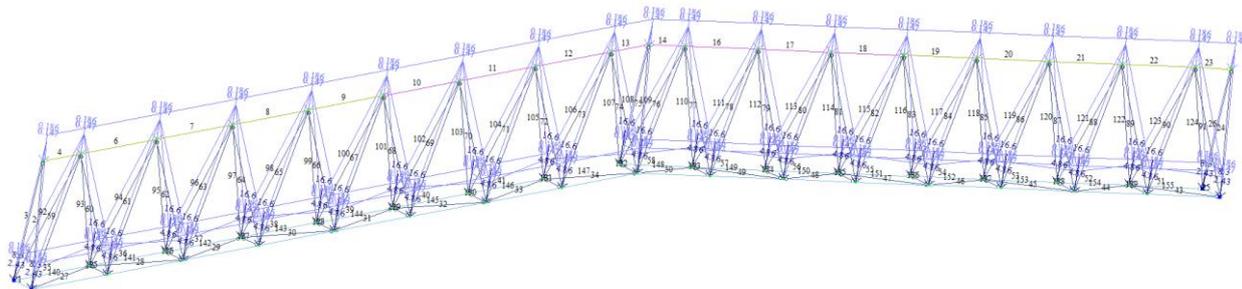


Рисунок 2 – Результаты загрузки фермы.

-Статический и конструктивный расчет выполнен с помощью программного комплекса ПК ЛИРА. В результате расчёта были определены усилия в стержнях фермы, по которым в дальнейшем производился подбор сечений стержней фермы. Стоит обратить внимание, что расчёт производится с использованием нормативных нагрузок по первой группе предельных состояний. Подобраны сечения стержней фермы. Подбор производился в табличной форме, с помощью программы Excel. При назначении сечений стержней учтено, что ферма на монтаж будет отправлена 4мя отправочными марками. Результаты входных данных и промежуточных расчетов представлены ниже (рис.3,4). Так как таблица подбора сечений стержней имеет большой объем, на рисунке представлена выдержка самых загруженных стержней.

Таблица жесткостей		
Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения- (см) жесткости- (кН,м) расп.вес- (кН,м))
1	Труба 325 x 5 (Пояс)	q=0.386797
		EF=1.03547e+006, EIy=1.33e+004
		EIz=1.33e+004, GIk=1e+004
		Y1=7.88, Y2=7.88, Z1=7.88, Z2=7.88, RU_Y=0, RU_Z=0
7	Труба 159 x 5	q=0.186146
		EF=498319, EIy=1.48e+003
		EIz=1.48e+003, GIk=1.12e+003
		Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0
8	Труба 127 x 5 (Решет)	q=0.147466
		EF=394772, EIy=736
		EIz=736, GIk=557
		Y1=2.93, Y2=2.93, Z1=2.93, Z2=2.93, RU_Y=0, RU_Z=0
9	Труба 377 x 5	q=0.449651
		EF=1.20373e+006, EIy=2.08e+004
		EIz=2.08e+004, GIk=1.58e+004
		Y1=9.18, Y2=9.18, Z1=9.18, Z2=9.18, RU_Y=0, RU_Z=0

Рисунок 3 – Таблица жесткостей.

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчетное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A тр. см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости		φ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry д/л/см ²	Принятое сечение	
			1	lx	ly				ix	iy	λx	λy					[λ]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	11	-1033	300	300	300	33.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.97	18.3	32	325*5
	12	-1084	300	300	300	35	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.97	19.2	32	325*5
	13	-1106	150	150	150	34.6	377*5	58.4	13	13	11	11.4	120	0.97	19.6	33	325*5
Нижний пояс	31	438	300	300	300	13.7	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	18.1	32	325*5
	32	488	300	300	300	15.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	20.2	32	325*5
	33	523	300	300	300	16.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	21.6	32	325*5
	34	540	300	300	300	16.9	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22.3	32	325*5
	40	490	300	300	300	15.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	20.3	32	325*5
	41	524	300	300	300	16.4	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	21.7	32	325*5
	42	543	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22.4	32	325*5
Раскосы	59	-209	490	490	490	8.32	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	13.9	32	127*5
	60	197	460	460	460	6.16	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	10.3	32	127*5
	61	-182	490	490	490	7.25	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	12.1	32	127*5
	62	171	460	460	460	5.34	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	8.92	32	127*5
	63	-154	490	490	490	6.13	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	10.2	32	127*5
	64	144	460	460	460	4.5	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	7.52	32	127*5
	65	-126	490	490	490	5.02	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	8.38	32	127*5
	66	120	460	460	460	3.75	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	6.26	32	127*5
	75	107	450	450	450	3.34	127*5	19.2	6.1	6.1	74	73.8	400	1	5.58	32	127*5
	92	-209	490	490	490	8.32	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	13.9	32	127*5
	93	198	460	460	460	6.19	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	10.3	32	127*5
	94	-182	490	490	490	7.25	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	12.1	32	127*5
	95	171	460	460	460	5.34	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	8.92	32	127*5
	96	-154	490	490	490	6.13	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	10.2	32	127*5
	97	144	460	460	460	4.5	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	7.52	32	127*5
	98	-127	490	490	490	5.06	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80.3	150	0.79	8.44	32	127*5
	99	121	460	460	460	3.78	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75.4	400	1	6.32	32	127*5

Рисунок 4 – Таблица подбора сечений.

Максимальный прогиб фермы составляет – 142 мм.

(Рис.5) красным цветом выделен самый напряженный стержень №42.

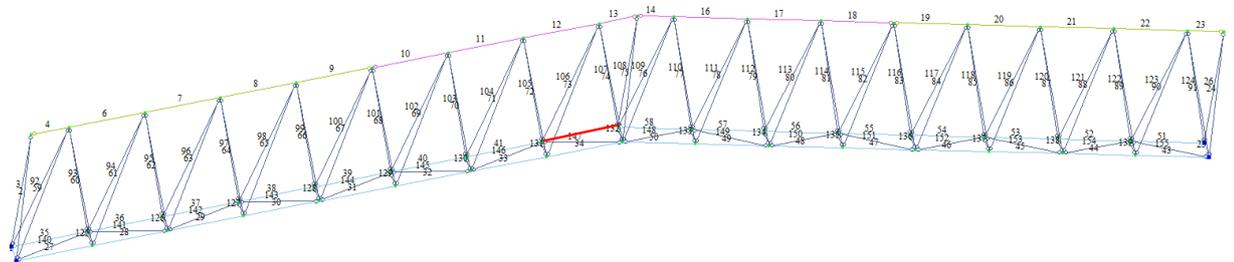


Рисунок 5 – Определение самого напряженного стержня.

2 этап:

На 2-м этапе работы конструкции моделируем прогрессирующее разрушение, удаляя из схемы наиболее напряженный стержень конструкции (рис.5).

- Произвожу статический расчет 1-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.6).

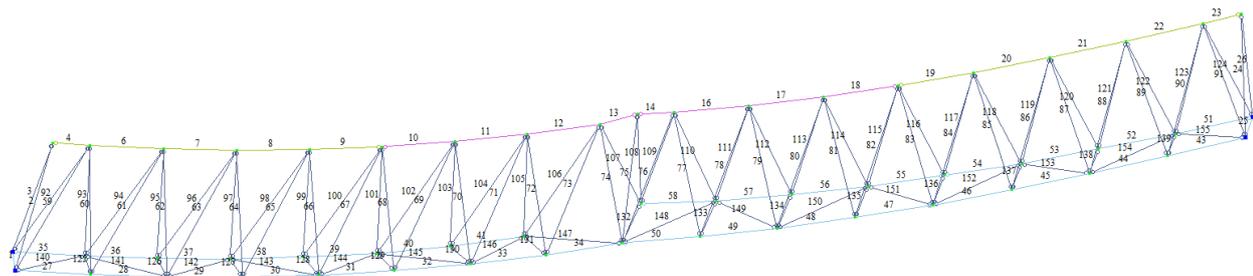


Рисунок 6 - Деформационная схема конструкции при разрушении на 1-й стадии.

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.7).

Сводная таблица подбора сечений стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A _{тр} , см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	R _y кН/см ²	Принятое сечение
			l	l _x	l _y				i _x	i _y	λ _x	λ _y	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	11	-1035	300	300	300	40.4	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	22.1	32	377*5
	12	-1076	300	300	300	42	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	23	32	377*5
	13	-1092	150	150	150	41.4	377*5	58.4	13	13	11	11.4	120	0.8	23.4	33	377*5
	14	-1105	150	150	150	40.6	377*5	58.4	13	13	11	11.4	120	0.8	23.6	34	377*5
	16	-1085	300	300	300	37.7	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	23.2	36	377*5
	17	-1033	300	300	300	34.9	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	22.1	37	377*5
	18	-948	300	300	300	31.2	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	20.3	38	377*5
Нижний пояс	27	809	300	300	300	25.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	33.4	32	159*5
	28	924	300	300	300	28.9	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	38.2	32	159*5
	29	934	300	300	300	29.2	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	38.6	32	159*5
	30	1014	300	300	300	31.7	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	41.9	32	159*5
	31	989	300	300	300	30.9	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	40.9	32	159*5
	32	1032	300	300	300	32.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	42.7	32	159*5
	33	968	300	300	300	30.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	40	32	159*5
	34	1063	300	300	300	33.2	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	43.9	32	159*5
	35	-725	300	300	300	28.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	120	0.8	37.5	32	159*5
	36	-512	300	300	300	20	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	120	0.8	26.5	32	159*5
	42		300	300	300	####	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400		####	32	159*5
	43	83	300	300	300	2.59	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	3.43	32	159*5
	44	264	300	300	300	8.25	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	10.9	32	159*5
	45	406	300	300	300	12.7	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	16.8	32	159*5
46	552	300	300	300	17.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22.8	32	159*5	
47	660	300	300	300	20.6	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	27.3	32	159*5	
48	769	300	300	300	24	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	31.8	32	159*5	
49	841	300	300	300	26.3	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	34.8	32	159*5	
50	908	300	300	300	28.4	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	37.5	32	159*5	
57	200	300	300	300	6.25	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	8.27	32	159*5	
58	181	300	300	300	5.66	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	7.48	32	159*5	
Раскосы	76	220	300	300	300	5.24	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	400	1	11.5	42	127*5
	77	-98	300	300	300	2.92	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	150	0.8	6.39	42	127*5
	78	118	300	300	300	2.81	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	400	1	6.16	42	127*5
	79	-144	300	300	300	4.29	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	150	0.8	9.39	42	127*5
	80	160	300	300	300	3.81	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	400	1	8.35	42	127*5
81	-164	300	300	300	4.88	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49.2	150	0.8	10.7	42	127*5	

Рисунок 7 – Таблица подбора сечений после 1-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 313 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 2 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.8).

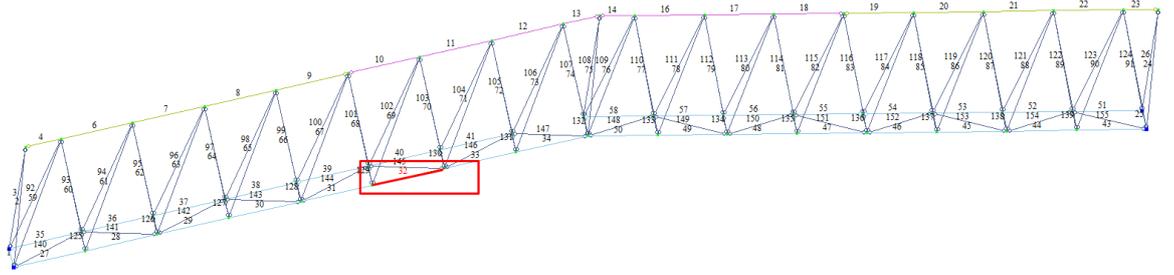


Рисунок 8 – Определение самого напряженного стержня 2 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 2-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.9).

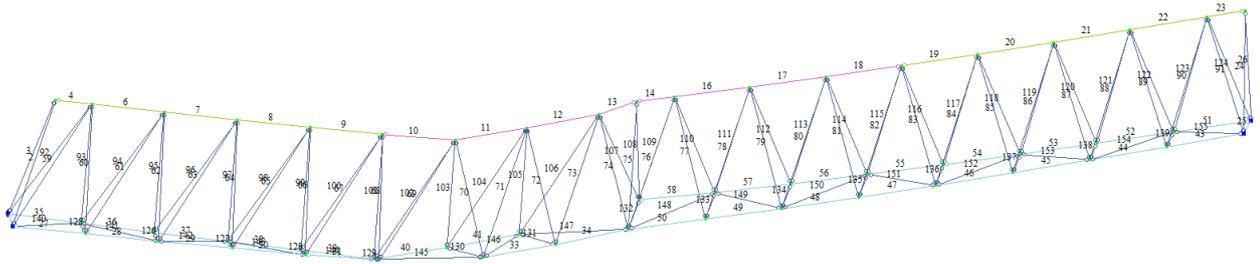


Рисунок 9 - Деформационная схема конструкции при разрушении на 2-й

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.10).

Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Грубая площадь сечения $A_{гр}$, см ²	Сечение	Площадь сечения A_s , см ²	Радиус инерции		Гибкости			σ	Напряжение σ (кН/см ²)	R _y кН/см ²	Привалот сечение	
			1	ix	iy				ix	iy	λ_x	λ_y	[λ]					
			2	3	4				5	6	7	8	9					10
Верхний пояс	8	-670	300	300	300	26	325*5	50.3	16	16	19	19	120	0.8	17	32	325*5	1
	9	-827	300	300	300	32	325*5	50.3	16	16	19	19	120	0.8	21	32	325*5	2
	10	-909	300	300	300	36	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	19	32	377*5	1
	11	-993	300	300	300	39	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	21	32	377*5	2
	12	-1063	300	300	300	42	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	23	32	377*5	2
	13	-1061	150	150	150	40	377*5	58.4	13	13	11	11	120	0.8	23	33	377*5	
	14	-1107	150	150	150	41	377*5	58.4	13	13	11	11	120	0.8	24	34	377*5	
	16	-1086	300	300	300	38	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	23	36	377*5	
	17	-1032	300	300	300	35	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	22	37	377*5	
	18	-947	300	300	300	31	377*5	58.4	13	13	23	23	120	0.8	20	38	377*5	
Нижний пояс	19	-827	300	300	300	27	325*5	50.3	16	16	19	19	120	0.8	21	39	325*5	
	20	-671	300	300	300	21	325*5	50.3	16	16	19	19	120	0.8	17	40	325*5	
	22	0	300	300	300	###	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	0	###	32	159*5	#
	33	554	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	23	32	159*5	
	34	689	300	300	300	22	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	28	32	159*5	
	39	555	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	23	32	159*5	
	40	662	300	300	300	21	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	27	32	159*5	
	41	687	300	300	300	21	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	28	32	159*5	
	42		300	300	300	###	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	###	32	159*5	
	48	532	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22	32	159*5	
раскосы	49	0	300	300	300	###	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	0	###	32	159*5	
	50	544	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22	32	159*5	
	56	596	300	300	300	19	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	25	32	159*5	
	57	0	300	300	300	###	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	0	###	32	159*5	
	58	655	300	300	300	20	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	27	32	159*5	
	68	-634	460	460	460	25	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75	150	0.8	41	32	127*5	#
	69	700	490	490	490	22	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80	400	1	37	32	127*5	#
	74	-826	460	460	460	32	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75	150	0.8	54	32	127*5	
	101	665	460	460	460	21	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75	400	1	35	32	127*5	
	102	-698	490	490	490	27	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80	150	0.8	46	32	127*5	
106	528	490	490	490	17	127*5	19.2	6.1	6.1	80	80	400	1	28	32	127*5		
107	1337	460	460	460	42	127*5	19.2	6.1	6.1	75	75	400	1	70	32	127*5		
108	-608	450	450	450	24	127*5	19.2	6.1	6.1	74	74	150	0.8	40	32	127*5		
76	614	300	300	300	15	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49	400	1	32	42	127*5		
109	-591	300	300	300	18	127*5	19.2	6.1	6.1	49	49	150	0.8	39	42	127*5		

Рисунок 10 – Таблица подбора сечений после 2-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 992 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 3 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.11).

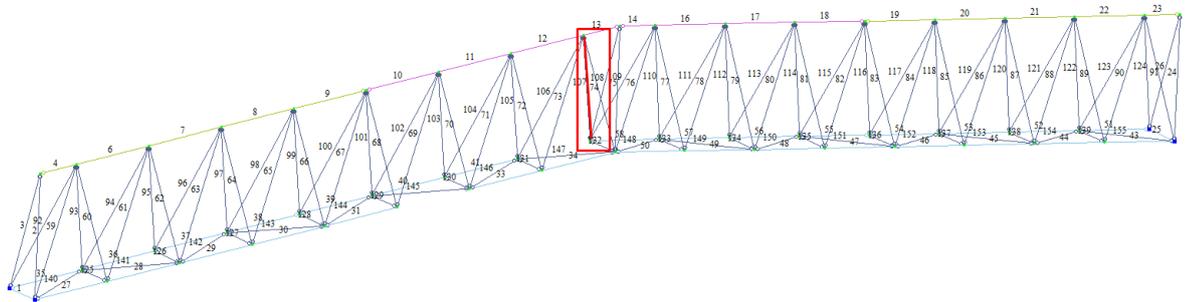


Рисунок 11 – Определение самого напряженного стержня 3 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 1490 мм.

Расчет прекращён, так как удаление последнего стержня привело к потери несущей способности всех остальных. Что привело к полному разрушению несущей системы.

В результате анализа работы данного типа фермы, мы пришли к выводу, что данный вид конструкции является надежным и не приводит к моментальному разрушению системы, при условия выхода из строя самых напряженных элементов.

Перейдём к рассмотрению 2 вида фермы:

Исходные данные.

На прогрессирующее разрушение исследовалась стальная призматическая ферма (рис.12). Ферма представляет собой пространственную стержневую конструкцию, пролетом 48 м, высотой 4.25 м. Узлы фермы – шарнирные. Опираение фермы назначено шарнирно неподвижное. Стержни выполнены из электросварных труб круглого сечения, сталь С345 по ГОСТ 27772-88. Нагрузка, согласно исходным данным узловая, приложена к верхнему поясу поясу, интенсивностью:

$$F_{\text{снеговая}} = 16,61 \text{ кН}$$

$$F_{\text{постоянная}} = 4.86 \text{ кН}$$

1 этап:

-Моделирование расчётной схемы в ПК ЛИРА САПР (рис.12).

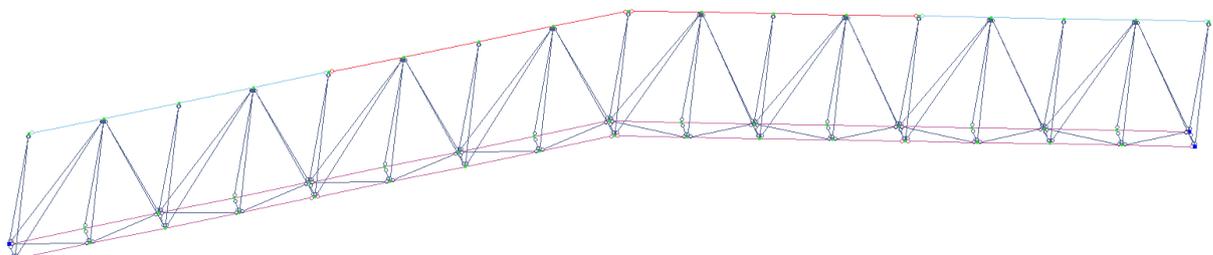


Рисунок 12 – схема фермы.

- Загрузка конструкции эксплуатационной нагрузкой (рис.13).

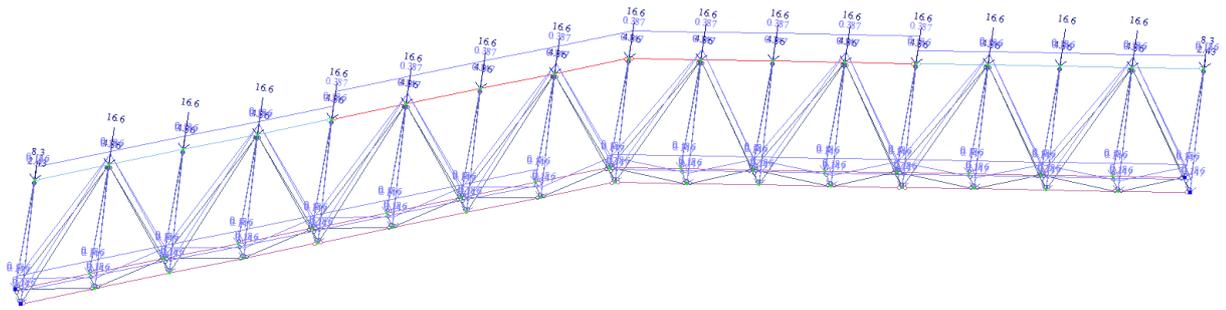


Рисунок 13 – Результаты загрузки фермы.

-Статический и конструктивный расчет выполнен с помощью программного комплекса ПК ЛИРА. В результате расчёта были определены усилия в стержнях фермы, по которым в дальнейшем производился подбор сечений стержней фермы. Стоит обратить внимание, что расчёт производится с использованием нормативных нагрузок по первой группе предельных состояний. Подобраны сечения стержней фермы. Подбор производился в табличной форме, с помощью программы Excel. При назначении сечений стержней учтено, что ферма на монтаж будет отправлена 4мя отправочными марками. Результаты входных данных и промежуточных расчетов представлены ниже (рис.14,15). Так как таблица подбора сечений стержней имеет большой объем, на рисунке представлена выдержка самых загруженных стержней.

Таблица жесткостей		
Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения- (см) жесткости- (кН,м) расп.вес- (кН, м))
4	Труба 159 x 5 (Пояс	q=0.186146
		EF=498319, EIy=1.48e+003
		EIz=1.48e+003, GIk=1.12e+003
		Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0
7	Труба 159 x 5 (В поя	q=0.186146
		EF=498319, EIy=1.48e+003
		EIz=1.48e+003, GIk=1.12e+003
		Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0
8	Труба 127 x 5 (Решет	q=0.147466
		EF=394772, EIy=736
		EIz=736, GIk=557
		Y1=2.93, Y2=2.93, Z1=2.93, Z2=2.93, RU_Y=0, RU_Z=0
9	Труба 325 x 5	q=0.386797
		EF=1.03547e+006, EIy=1.33e+004
		EIz=1.33e+004, GIk=1e+004
		Y1=7.88, Y2=7.88, Z1=7.88, Z2=7.88, RU_Y=0, RU_Z=0

Рисунок 14 – Таблица жесткостей.

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения Атр, см ²	Сечение	Площадь сечения А, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			1	ix	iy				ix	iy	λx	λy	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	3	0	300	300	300	0	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	120	0.925	0	32	159*5
	4	-273	300	300	300	9.223	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	120	0.925	12.2	32	159*5
	5	-273	300	300	300	9.223	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	120	0.925	12.2	32	159*5
	6	-470	300	300	300	15.88	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	120	0.925	21	32	159*5
	7	-470	300	300	300	15.17	325*2	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.968	9.66	32	325*2
	8	-588	300	300	300	18.98	325*3	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.968	12.1	32	325*3
	9	-588	300	300	300	18.98	325*4	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.968	12.1	32	325*4
	10	-628	300	300	300	20.27	325*5	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.968	12.9	32	325*5
	23	268	300	300	300	8.375	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	11.1	32	159*5
Нижний пояс	24	268	300	300	300	8.375	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	11.1	32	159*5
	25	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	12.7	32	159*5
	26	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	12.7	32	159*5
	43	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	12.7	32	159*5
	44	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	12.7	32	159*5
	45	268	300	300	300	8.375	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	11.1	32	159*5
	46	268	300	300	300	8.375	159*5	24.19	7.7	7.7	39	39	400	1	11.1	32	159*5
	100	-138	565	565	565	10.97	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	150	0.393	18.3	32	127*5
Раскосы	101	-138	565	565	565	10.97	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	150	0.393	18.3	32	127*5
	102	109	565	565	565	3.406	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	400	1	5.69	32	127*5
	103	109	565	565	565	3.406	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	400	1	5.69	32	127*5
	104	-101	565	565	565	8.031	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	150	0.393	13.4	32	127*5
	105	-101	565	565	565	8.031	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	150	0.393	13.4	32	127*5
	106	76	565	565	565	2.375	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	400	1	3.97	32	127*5
	107	77	565	565	565	2.406	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	400	1	4.02	32	127*5
	108	-64	565	565	565	5.089	127*5	19.16	4.32	4.32	131	131	150	0.393	8.5	32	127*5

Рисунок 15 – Таблица подбора сечений.

Максимальный прогиб фермы составляет – 88 мм.

(Рис.16) красным цветом выделен самый напряженный стержень №6.

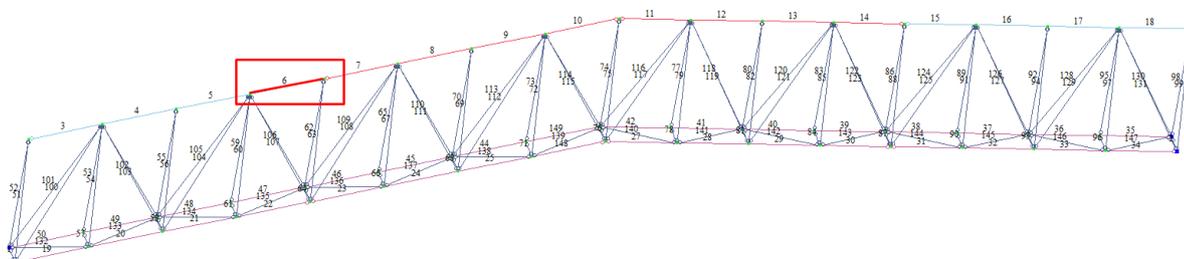


Рисунок 16 – Определение самого напряженного стержня.

2 этап:

На 2-м этапе работы конструкции моделируем прогрессирующее разрушение, удаляя из схемы наиболее напряженный стержень конструкции, см. на рисунке 16 выделенный стержень.

- Произвожу статический расчет 1-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.17).

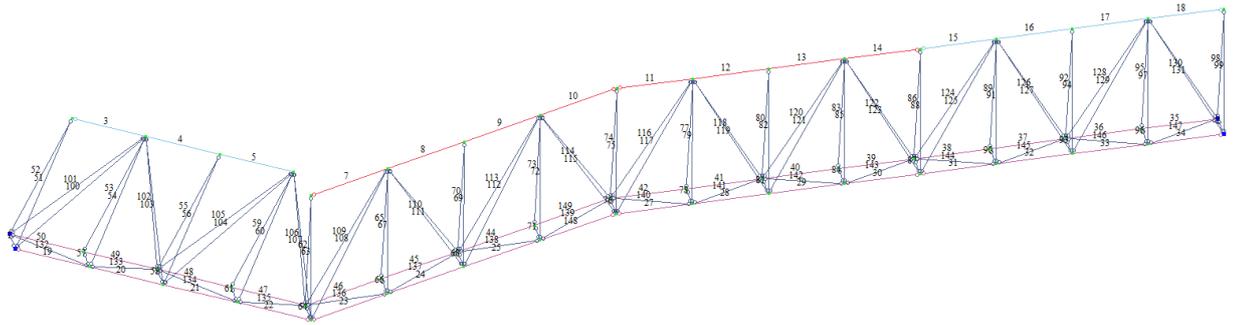


Рисунок 17 - Деформационная схема конструкции при разрушении на 1-й стадии.

Максимальный прогиб – $172\ 000\ \text{мм} = 172\ \text{м}$. Это означает, что вывод из строя данного элемента приводит к моментальному разрушению в связи с этим конструктивно увеличим его сечение и продолжим анализ. Производим повторный подбор сечений (рис.18,19).

Таблица жесткостей		
Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения-(см) жесткости-(кН,м) расп.вес-(кН,м))
4	Труба 159 x 5 (Пояс)	$q=0.186146$
		$EF=498319, EI_y=1.48e+003$
		$EI_z=1.48e+003, GI_k=1.12e+003$
		$Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0$
7	Труба 159 x 5 (В пояс)	$q=0.186146$
		$EF=498319, EI_y=1.48e+003$
		$EI_z=1.48e+003, GI_k=1.12e+003$
		$Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0$
8	Труба 127 x 5 (Решетка)	$q=0.147466$
		$EF=394772, EI_y=736$
		$EI_z=736, GI_k=557$
		$Y1=2.93, Y2=2.93, Z1=2.93, Z2=2.93, RU_Y=0, RU_Z=0$
9	Труба 325 x 5	$q=0.386797$
		$EF=1.03547e+006, EI_y=1.33e+004$
		$EI_z=1.33e+004, GI_k=1e+004$
		$Y1=7.88, Y2=7.88, Z1=7.88, Z2=7.88, RU_Y=0, RU_Z=0$
10	Труба 377 x 5	$q=0.449651$
		$EF=1.20373e+006, EI_y=2.08e+004$
		$EI_z=2.08e+004, GI_k=1.58e+004$
		$Y1=9.18, Y2=9.18, Z1=9.18, Z2=9.18, RU_Y=0, RU_Z=0$

Рисунок 18 – Таблица жесткостей элементов.

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы

Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A_{tr} , см ²	Сечение	Площадь сечения A , см ²	Радиус инерции		Гибкости			ϕ	Напряжение σ (кН/см ²)	R_y кН/см ²	Принятое сечение
			1	l_x	l_y				i_x	i_y	λ_x	λ_y	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	6	-468	300	300	300	18.28	325*5	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.8	11.6	32	325*5
	7	-469	300	300	300	18.32	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	10	32	377*5
	8	-588	300	300	300	22.97	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.6	32	377*5
	9	-591	300	300	300	23.09	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.6	32	377*5
	10	-622	300	300	300	24.3	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	13.3	32	377*5
	11	-625	300	300	300	24.41	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	13.4	32	377*5
	12	-585	300	300	300	22.85	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.5	32	377*5
	13	-585	300	300	300	22.85	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.5	32	377*5
	14	-469	300	300	300	18.32	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	10	32	377*5
	15	-469	300	300	300	18.32	325*5	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.8	11.7	32	325*5
Нижний пояс	19	513	300	300	300	16.03	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	21.2	32	159*5
	20	441	300	300	300	13.78	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	18.2	32	159*5
	21	574	300	300	300	17.94	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	23.7	32	159*5
	22	504	300	300	300	15.75	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	20.8	32	159*5
	23	595	300	300	300	18.59	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	24.6	32	159*5
	24	522	300	300	300	16.31	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	21.6	32	159*5
	25	616	300	300	300	19.25	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	25.5	32	159*5
	146	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	12.7	32	159*5
	43	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	12.7	32	159*5
	27	485	300	300	300	15.16	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	20	32	159*5
28	406	300	300	300	12.69	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	16.8	32	159*5	

Рисунок 19 – Таблица подбора сечений.

Максимальный прогиб фермы составляет – 58 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 1 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.20).

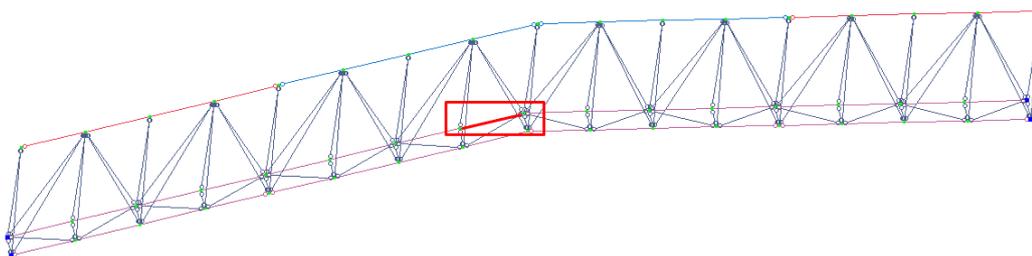


Рисунок 20 – Определение самого напряженного стержня 1 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 1-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.21).

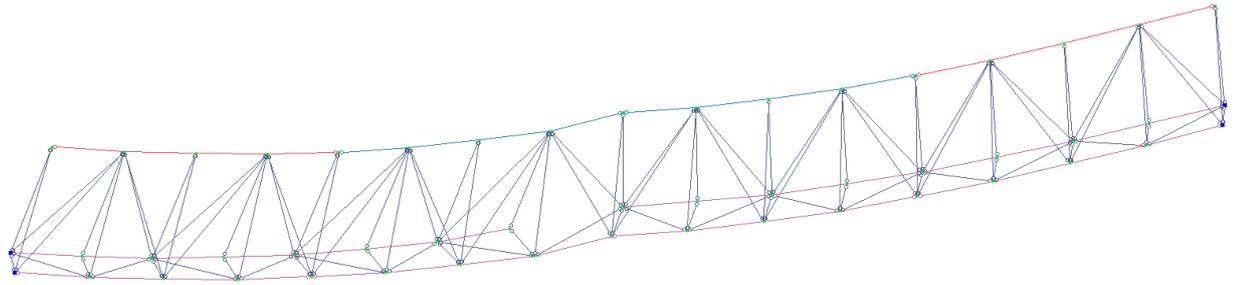


Рисунок 21- Деформационная схема конструкции при разрушении на 1-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.22).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A _{тр} , см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	R _y кН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	λ _x	λ _y	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	6	-468	300	300	300	18.28	325*5	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.8	11.6	32	325*5
	7	-469	300	300	300	18.32	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	10	32	325*5
	8	-588	300	300	300	22.97	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.6	32	325*5
	9	-591	300	300	300	23.09	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.6	32	325*5
	10	-622	300	300	300	24.3	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	13.3	32	325*5
	11	-625	300	300	300	24.41	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	13.4	32	325*5
	12	-585	300	300	300	22.85	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.5	32	325*5
	13	-585	300	300	300	22.85	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	12.5	32	325*5
	14	-469	300	300	300	18.32	377*5	58.43	13.2	13.2	22.8	22.81	120	0.8	10	32	325*5
Нижний пояс	15	-469	300	300	300	18.32	325*5	50.27	11.3	11.3	26.5	26.5	120	0.8	11.7	32	325*5
	19	513	300	300	300	16.03	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	21.2	32	159*5
	20	441	300	300	300	13.78	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	18.2	32	159*5
	21	574	300	300	300	17.94	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	23.7	32	159*5
	22	504	300	300	300	15.75	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	20.8	32	159*5
	23	595	300	300	300	18.59	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	24.6	32	159*5
	24	522	300	300	300	16.31	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	21.6	32	159*5
	25	616	300	300	300	19.25	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	25.5	32	159*5
	146	307	300	300	300	9.594	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	12.7	32	159*5
	43	0	300	300	300	0	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	0	32	159*5
27	485	300	300	300	15.16	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	20	32	159*5	
28	406	300	300	300	12.69	159*5	24.19	7.7	7.7	39	38.96	400	1	16.8	32	159*5	

Рисунок 22 – Таблица подбора сечений после 1-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 510 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 2 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.23).

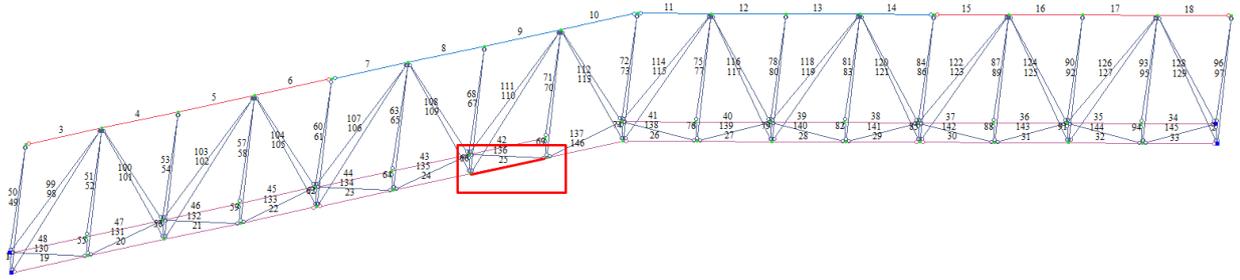


Рисунок 23 – Определение самого напряженного стержня 2 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 1330 мм.

- Произвожу статический расчет 2-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.24).

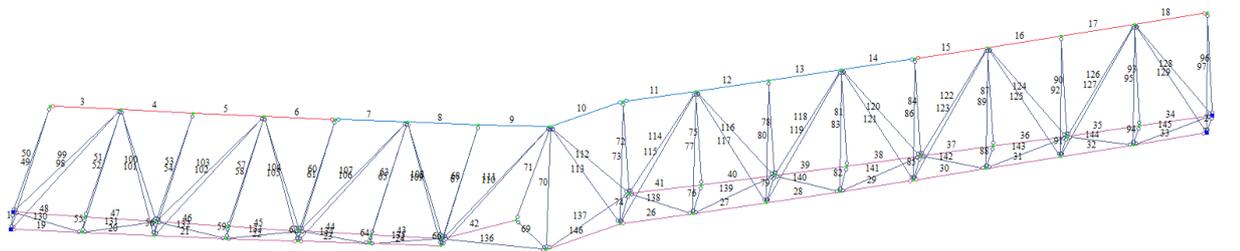


Рисунок 24- Деформационная схема конструкции при разрушении на 2-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.25).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Трубчатая площадь сечения Атр, см ²	Сечение	Площадь сечения А, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry дН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	λx	λy	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	8	-616	300	300	300	24.1	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.2	32	325*5
	9	-671	300	300	300	26.2	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	14.4	32	325*5
	10	-589	300	300	300	23	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.6	32	325*5
	11	-623	300	300	300	24.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.3	32	325*5
	12	-584	300	300	300	22.8	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.5	32	325*5
	13	-584	300	300	300	22.8	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.5	32	325*5
	14	-468	300	300	300	18.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	10	32	325*5
Нижний пояс	15	-468	300	300	300	18.3	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.8	11.6	32	325*5
	25	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	43	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	27	545	300	300	300	17	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	22.5	32	159*5
	29	495	300	300	300	15.5	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	20.5	32	159*5
	30	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	31	406	300	300	300	12.7	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	16.8	32	159*5
	103	-474	565	565	565	18.5	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	30.9	32	127*5
	104	-442	565	565	565	13.8	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	1	23.1	32	127*5
	107	-437	565	565	565	17.1	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	28.5	32	127*5
Раскосы	108	457	565	565	565	14.3	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	1	23.9	32	127*5
	110	562	565	565	565	17.6	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	1	29.3	32	127*5
	112	748	565	565	565	23.4	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	1	39	32	127*5
	136	411	425	425	425	12.8	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	21.5	32	127*5
	146	498	425	425	425	15.6	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	26	32	127*5
	147	498	425	425	425	15.6	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	26	32	127*5
	119	422	425	425	425	13.2	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	22	32	127*5
	121	-442	425	425	425	17.3	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	28.8	32	127*5
	123	451	425	425	425	14.1	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	23.5	32	127*5
	125	-480	425	425	425	18.8	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	31.3	32	127*5
	127	482	425	425	425	15.1	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	25.2	32	127*5
	129	-529	425	425	425	20.7	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	34.5	32	127*5
99	-520	425	425	425	20.3	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	33.9	32	127*5	

Рисунок 25 – Таблица подбора сечений после 2-й стадии разрушения.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 3 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.26).

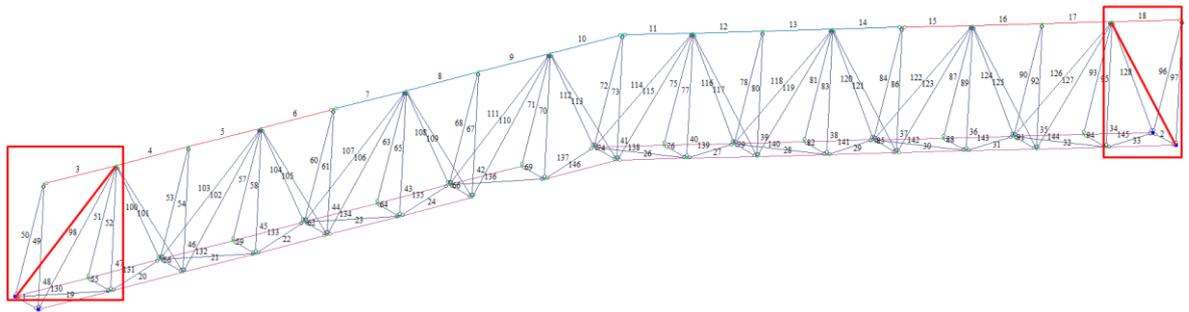


Рисунок 26 – Определение самого напряженного стержня 3 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 1750 мм.
 - Произвожу статический расчет 3-й стадии аварийного обрушения.
 Деформационная схема фермы (рис.27).

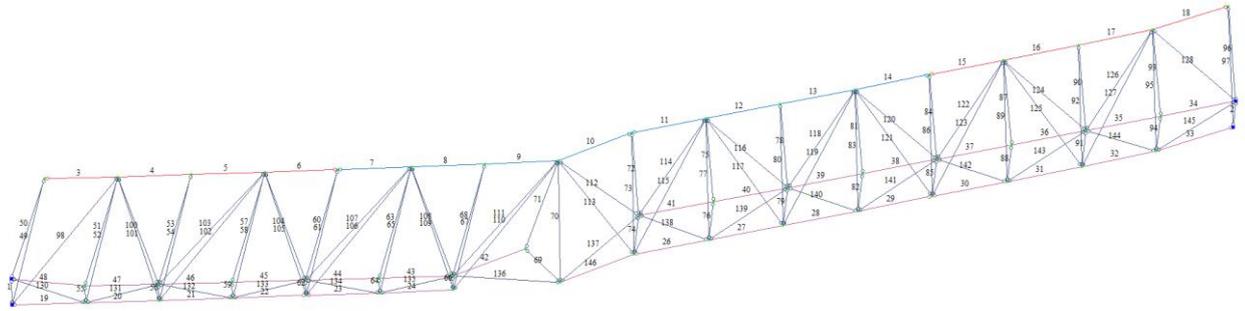


Рисунок 27- Деформационная схема конструкции при разрушении на 3-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.28).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A_{tr} , см ²	Сечение	Площадь сечения A , см ²	Радиус инерции		Гибкости			ϕ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	lx	ly	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	8	-624	300	300	300	24.4	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.3	32	325*5
	9	-696	300	300	300	27.2	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	14.9	32	325*5
	10	-578	300	300	300	22.6	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.4	32	325*5
	11	-623	300	300	300	24.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.3	32	325*5
	12	-583	300	300	300	22.8	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.5	32	325*5
	13	-583	300	300	300	22.8	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.5	32	325*5
	14	-468	300	300	300	18.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	10	32	325*5
	15	-467	300	300	300	18.2	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.8	11.6	32	325*5
Нижний пояс	25	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	43	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	27	373	300	300	300	11.7	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	15.4	32	159*5
	29	337	300	300	300	10.5	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	13.9	32	159*5
	30	110	300	300	300	3.44	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	4.55	32	159*5
	31	262	300	300	300	8.19	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	10.8	32	159*5
	103	-220	565	565	565	8.59	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	14.4	32	127*5
	104	220	565	565	565	6.88	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	11.5	32	127*5
	107	-208	565	565	565	8.13	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	13.6	32	127*5
	108	251	565	565	565	7.84	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	13.1	32	127*5
Раскосы	110	562	565	565	565	17.6	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	29.3	32	127*5
	112	633	565	565	565	19.8	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	33	32	127*5
	136	282	425	425	425	8.81	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	14.7	32	127*5
	146	290	425	425	425	9.06	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	15.1	32	127*5
	119	184	425	425	425	5.75	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	9.6	32	127*5
	121	-203	425	425	425	7.93	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	13.2	32	127*5
	123	210	425	425	425	6.56	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	11	32	127*5
	125	-215	425	425	425	8.4	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	14	32	127*5
	127	485	425	425	425	15.2	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	25.3	32	127*5
	129	-529	425	425	425	20.7	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	34.5	32	127*5
	99	-520	425	425	425	20.3	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	33.9	32	127*5

Рисунок 28 – Таблица подбора сечений после 3-й стадии разрушения.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 4 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.29).

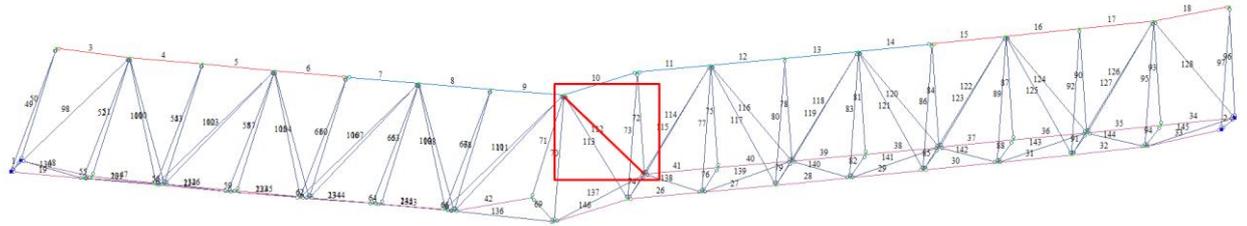


Рисунок 29 – Определение самого напряженного стержня 3 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 2120 мм.

- Произвожу статический расчет 4-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.30).

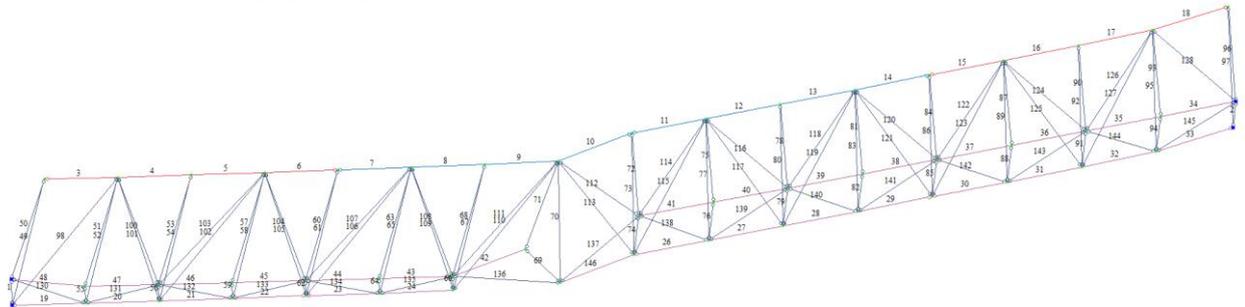


Рисунок 30- Деформационная схема конструкции при разрушении на 4-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.31).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A тр, см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	λx	λy	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	8	-624	300	300	300	24.4	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.3	32	325*5
	9	-699	300	300	300	27.3	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	15	32	325*5
	10	-573	300	300	300	22.4	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.3	32	325*5
	11	-620	300	300	300	24.2	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	13.3	32	325*5
	12	-580	300	300	300	22.7	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.4	32	325*5
	13	-581	300	300	300	22.7	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	12.4	32	325*5
	14	-467	300	300	300	18.2	377*5	58.4	13	13	23	22.8	120	0.8	9.99	32	325*5
Нижний пояс	15	-467	300	300	300	18.2	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.8	11.6	32	325*5
	25	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	43	0	300	300	300	0	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	0	32	159*5
	27	452	300	300	300	14.1	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	18.7	32	159*5
	29	382	300	300	300	11.9	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	15.8	32	159*5
	30	179	300	300	300	5.59	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	7.4	32	159*5
	31	277	300	300	300	8.66	159*5	24.2	7.7	7.7	39	39	400	1	11.5	32	159*5
	103	-174	565	565	565	6.8	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	11.4	32	127*5
	104	157	565	565	565	4.91	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	8.19	32	127*5
	107	-142	565	565	565	5.55	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	150	0.8	9.26	32	127*5
Раскосы	108	190	565	565	565	5.94	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	9.92	32	127*5
	110	660	565	565	565	20.6	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	34.4	32	127*5
	112	633	565	565	565	19.8	127*5	19.2	4.3	4.3	131	131	400	1	33	32	127*5
	136	229	425	425	425	7.16	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	12	32	127*5
	146	189	425	425	425	5.91	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	9.86	32	127*5
	119	184	425	425	425	5.75	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	9.6	32	127*5
	121	-203	425	425	425	7.93	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	13.2	32	127*5
	123	210	425	425	425	6.56	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	11	32	127*5
	125	-215	425	425	425	8.4	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	14	32	127*5
	127	435	425	425	425	13.6	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	400	1	22.7	32	127*5
	129	-529	425	425	425	20.7	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	34.5	32	127*5
	99	-520	425	425	425	20.3	127*5	19.2	4.3	4.3	98	98.4	150	0.8	33.9	32	127*5

Рисунок 31 – Таблица подбора сечений после 4-й стадии разрушения.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 5 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.32).

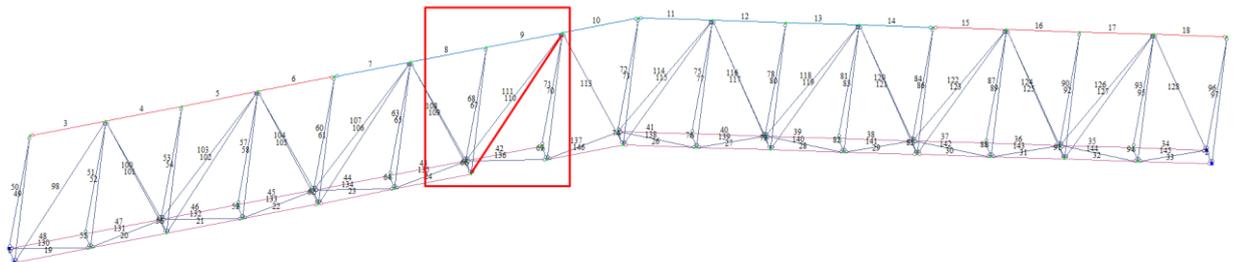


Рисунок 32 – Определение самого напряженного стержня 5 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 2420 мм.

- Произвожу статический расчет 3-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.33).

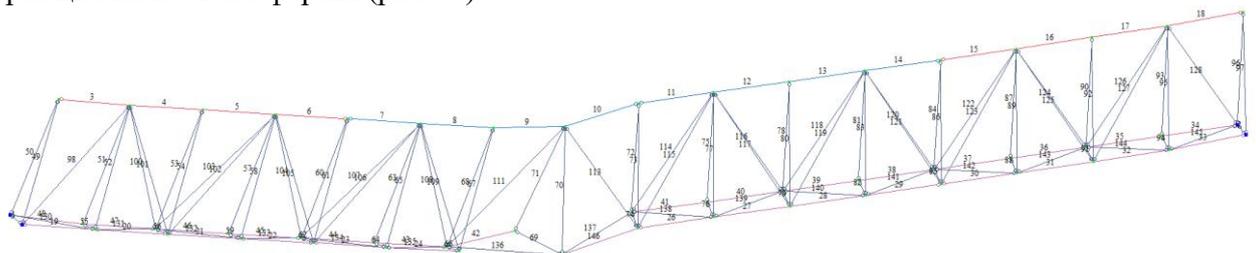


Рисунок 33- Деформационная схема конструкции при разрушении на 5-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.34).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A_{tr} , см ²	Сечение	Площадь сечения A_s , см ²	Радиус инерции		Гибкости			ϕ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			l (см)	lx (см)	ly (см)				ix	iy	λ_x	λ_y	$[\lambda]$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	8	-567	300	300	300	22.148	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	12.13	32	325*5
	9	-614	300	300	300	23.984	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	13.135	32	325*5
	10	-575	300	300	300	22.461	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	12.301	32	325*5
	11	-618	300	300	300	24.141	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	13.221	32	325*5
	12	-580	300	300	300	22.656	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	12.408	32	325*5
	13	-580	300	300	300	22.656	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	12.408	32	325*5
Нижний пояс	14	-618	300	300	300	24.141	377*5	58.43	13.15	13.15	22.814	22.814	120	0.8	13.221	32	325*5
	15	575	300	300	300	22.461	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.298	32	325*5
	25	0	300	300	300	0	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	0	32	159*5
	43	0	300	300	300	0	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	0	32	159*5
	27	336	300	300	300	10.5	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	13.89	32	159*5
	29	295	300	300	300	9.2188	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	12.195	32	159*5
	30	168	300	300	300	5.25	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	6.945	32	159*5
	31	214	300	300	300	6.6875	159*5	24.19	7.7	7.7	38.961	38.961	400	1	8.8466	32	159*5
	103	-122	565	565	565	4.7656	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	150	0.8	7.9593	32	127*5
	104	110	565	565	565	3.4375	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	150	0.8	5.7411	32	127*5
Раскосы	107	-95	565	565	565	3.7109	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	150	0.8	6.1978	32	127*5
	108	350	565	565	565	10.938	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	400	1	18.267	32	127*5
	110	660	565	565	565	20.625	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	400	1	34.447	32	127*5
	112	0	565	565	565	0	127*5	19.16	4.32	4.32	130.79	130.79	400	1	0	32	127*5
	136	104	425	425	425	3.25	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	5.428	32	127*5
	146	161	425	425	425	5.0313	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	8.4029	32	127*5
	119	96	425	425	425	3	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	5.0104	32	127*5
	121	-110	425	425	425	4.2969	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	150	0.8	7.1764	32	127*5
	123	110	425	425	425	3.4375	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	5.7411	32	127*5
	125	-115	425	425	425	4.4922	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	150	0.8	7.5026	32	127*5
127	300	425	425	425	9.375	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	15.658	32	127*5	
129	-529	425	425	425	20.664	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	150	0.8	34.512	32	127*5	
99	-520	425	425	425	20.313	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	150	0.8	33.925	32	127*5	

Рисунок 34 – Таблица подбора сечений после 5-й стадии разрушения.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 6 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.35).

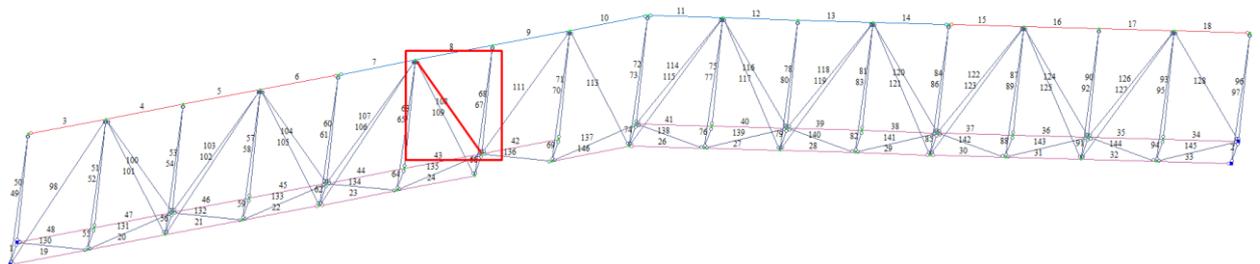


Рисунок 35 – Определение самого напряженного стержня 6 стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 2510 мм.

- Произвожу статический расчет 6-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.36).

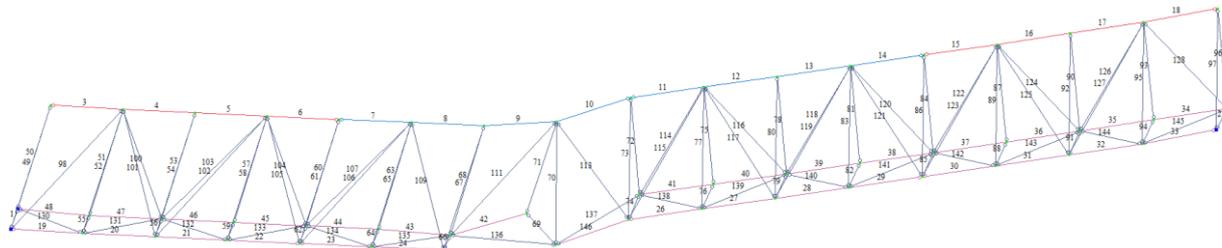


Рисунок 36- Деформационная схема конструкции при разрушении на 6-й стадии

Анализируя разницу перемещений последних разрушений, мы делаем вывод, что система стабилизировалась. Данный вид фермы является удачным решением для предотвращения лавинообразных разрушений, при условии, если сечение верхнего пояса увеличено конструктивно, т.к. в случае выхода из строя элементов верхнего пояса происходит разрушение.

Перейдём к рассмотрению 3 вида фермы:

Исходные данные.

На прогрессирующее разрушение исследовалась стальная призматическая ферма (рис.37). Ферма представляет собой пространственную стержневую конструкцию, пролетом 48 м, высотой 4.25 м. Узлы фермы – шарнирные. Опирание фермы назначено шарнирно неподвижное. Стержни выполнены из электросварных труб круглого сечения, сталь С345 по ГОСТ 27772-88. Нагрузка, согласно исходным данным узловая, приложена к верхнему поясу поясу, интенсивностью:

$$F_{\text{снеговая}}=16.61 \text{ кН}$$

$$F_{\text{постоянная}}=4.86 \text{ кН}$$

1 этап:

-Моделирование расчётной схемы в ПК ЛИРА САПР (рис.37).

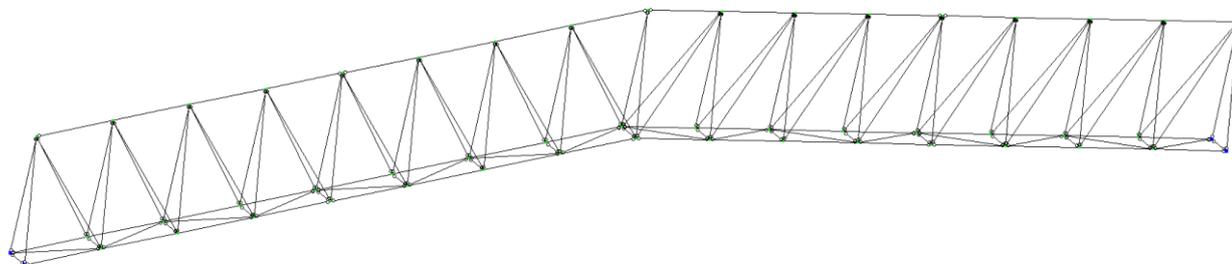


Рисунок 37 – Схема фермы.

- Загружение конструкции эксплуатационной нагрузкой (рис.38).

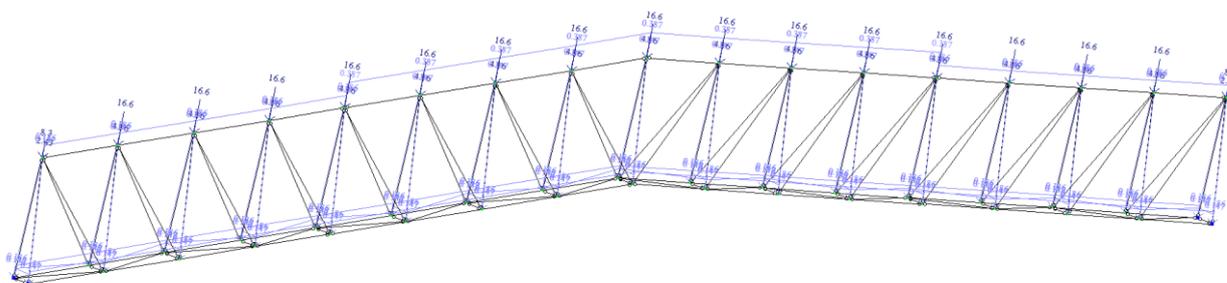


Рисунок 38 – Результаты загрузки фермы.

-Статический и конструктивный расчет выполнен с помощью программного комплекса ПК ЛИРА. В результате расчёта были определены усилия в стержнях фермы, по которым в дальнейшем производился подбор сечений стержней фермы. Стоит обратить внимание, что расчёт производится с использованием нормативных нагрузок по первой группе предельных состояний. Подобраны сечения стержней фермы. Подбор производился в табличной форме, с помощью программы Excel. При назначении сечений стержней учтено, что ферма на монтаж будет отправлена 4мя отправочными марками. Результаты входных данных и промежуточных расчетов представлены ниже (рис.39,40). Так как таблица подбора сечений стержней имеет большой объем, на рисунке представлена выдержка самых загруженных стержней.

Таблица жесткостей		
Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения- (см) жесткости- (кН,м) расп.вес- (кН,м))
1	Труба 325 x 5 (пояс	q=0.386797
		EF=1.03547e+006, EIy=1.33e+004
		EIz=1.33e+004, GIk=1e+004
		Y1=7.88, Y2=7.88, Z1=7.88, Z2=7.88, RU_Y=0, RU_Z=0
4	Труба 159 x 5 (Пояс	q=0.186146
		EF=498319, EIy=1.48e+003
		EIz=1.48e+003, GIk=1.12e+003
		Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0
8	Труба 127 x 5 (Решет	q=0.147466
		EF=394772, EIy=736
		EIz=736, GIk=557
		Y1=2.93, Y2=2.93, Z1=2.93, Z2=2.93, RU_Y=0, RU_Z=0

Рисунок 39 – Таблица жесткостей.

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A_{tr} , см ²	Сечение	Площадь сечения A , см ²	Радиус инерции		Гибкости			ϕ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	lx	ly	[λ]				
			1	2	3				4	5	6	7	8				
Верхний пояс	1	-138	300	300	300	4.31	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	120	0.85	6.7	32	159*5
	2	-258	300	300	300	9.47	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	120	0.85	12.5	32	159*5
	3	-359	300	300	300	13.2	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	120	0.85	17.4	32	159*5
	4	-443	300	300	300	16.3	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	120	0.85	21.5	32	159*5
	5	-507	300	300	300	16.4	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	10.4	32	325*5
	6	-554	300	300	300	17.9	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	11.4	32	325*5
	7	-581	300	300	300	18.8	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	11.9	32	325*5
	8	-592	300	300	300	19.1	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	12.2	32	325*5
Нижний пояс	21	222	300	300	300	6.94	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	9.18	32	159*5
	22	253	300	300	300	7.91	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	10.5	32	159*5
	23	277	300	300	300	8.66	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.5	32	159*5
	24	290	300	300	300	9.06	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	12	32	159*5
	38	252	300	300	300	7.88	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	10.4	32	159*5
	39	275	300	300	300	8.59	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.4	32	159*5
	40	289	300	300	300	9.03	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.9	32	159*5
Раскосы	50	-110	450	450	450	7.24	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	12.1	32	127*5
	51	-110	450	450	450	7.24	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	12.1	32	127*5
	52	-1	300	300	300	0.04	127*5	19.2	4.3	4.3	69	69.4	150	0.79	0.07	32	127*5
	53	-102	450	450	450	6.71	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	11.2	32	127*5
	54	-102	450	450	450	6.71	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	11.2	32	127*5
	116	119	520	520	520	3.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	6.21	32	127*5
	117	118	520	520	520	3.69	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	6.16	32	127*5
	118	102	520	520	520	3.19	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	5.32	32	127*5
	119	103	520	520	520	3.22	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	5.38	32	127*5
	120	87	520	520	520	2.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	4.54	32	127*5
121	87	520	520	520	2.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	4.54	32	127*5	

Рисунок 40 – Таблица подбора сечений.

Максимальный прогиб фермы составляет – 90 мм.

(Рис.41) красным цветом выделен самый напряженный стержень №6.

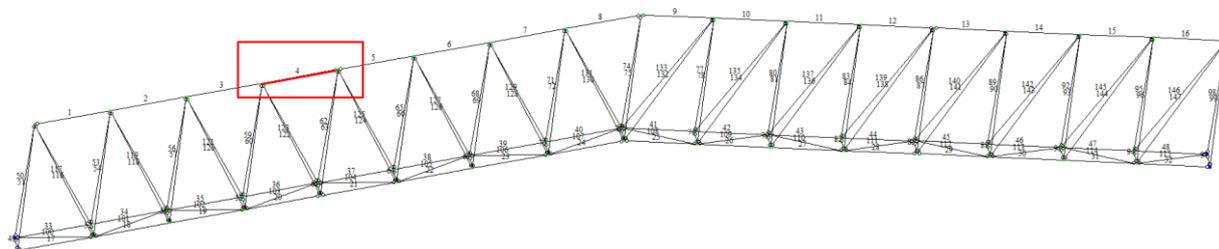


Рисунок 41 – Определение самого напряженного стержня.

2 этап:

На 2-м этапе работы конструкции моделируем прогрессирующее разрушение, удаляя из схемы наиболее напряженный стержень конструкции.

- Произвожу статический расчет 1-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.42).

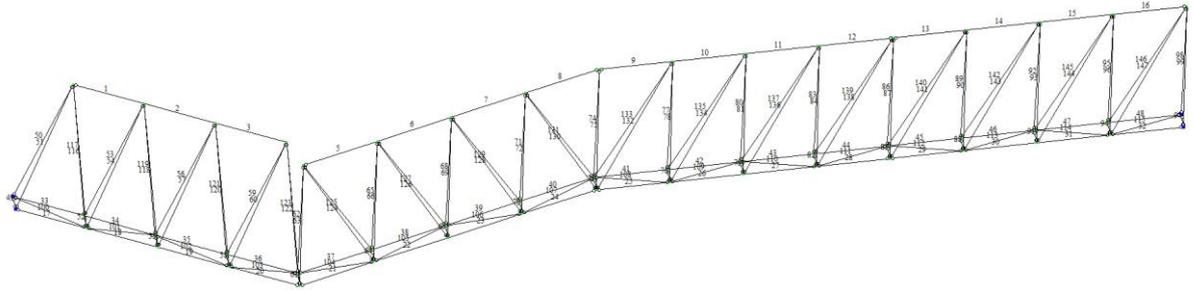


Рисунок 42- Деформационная схема конструкции при разрушении на 1-й стадии.

Максимальный прогиб – 158 000 мм =158 м. Это означает, что вывод из строя данного элемента приводит к моментальному разрушению в связи с этим конструктивно увеличим его сечение и продолжим анализ. Производим повторный подбор сечений (рис.43,44).

Таблица жесткостей		
Тип жесткости	Имя	Параметры (сечения-(см) жесткости-(кН,м) расп.вес-(кН,м))
1	Труба 325 x 5 (пояс)	q=0.386797
		EF=1.03547e+006, EIy=1.33e+004
		EIz=1.33e+004, GIk=1e+004
		Y1=7.88, Y2=7.88, Z1=7.88, Z2=7.88, RU_Y=0, RU_Z=0
4	Труба 159 x 5 (Пояс)	q=0.186146
		EF=498319, EIy=1.48e+003
		EIz=1.48e+003, GIk=1.12e+003
		Y1=3.73, Y2=3.73, Z1=3.73, Z2=3.73, RU_Y=0, RU_Z=0
8	Труба 127 x 5 (Решет)	q=0.147466
		EF=394772, EIy=736
		EIz=736, GIk=557
		Y1=2.93, Y2=2.93, Z1=2.93, Z2=2.93, RU_Y=0, RU_Z=0

Рисунок 43 – Таблица жесткостей элементов.

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																	
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A тр. см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	Ry кН/см ²	Принятое сечение
			1	lx	ly				ix	iy	lx	ly	[λ]				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Верхний пояс	1	-138	300	300	300	4.31	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	2.84	32	325*5
	2	-258	300	300	300	8.33	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	5.3	32	325*5
	3	-359	300	300	300	11.6	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	7.38	32	325*5
	4	-443	300	300	300	14.3	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	9.1	32	325*5
	5	-507	300	300	300	16.4	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	10.4	32	325*5
	6	-554	300	300	300	17.9	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	11.4	32	325*5
	7	-581	300	300	300	18.8	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.97	11.9	32	325*5
	8	-592	300	300	300	18.9	325*5	50.3	11	11	27	26.5	120	0.98	12	32	325*5
Нижний пояс	21	222	300	300	300	6.94	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	9.18	32	159*5
	22	253	300	300	300	7.91	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	10.5	32	159*5
	23	277	300	300	300	8.66	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.5	32	159*5
	24	290	300	300	300	9.06	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	12	32	159*5
	38	252	300	300	300	7.88	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	10.4	32	159*5
	39	275	300	300	300	8.59	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.4	32	159*5
	40	289	300	300	300	9.03	159*5	24.2	5.5	5.5	55	55	400	1	11.9	32	159*5
Раскосы	50	-110	450	450	450	7.24	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	12.1	32	127*5
	51	-110	450	450	450	7.24	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	12.1	32	127*5
	52	-1	300	300	300	0.04	127*5	19.2	4.3	4.3	69	69.4	150	0.79	0.07	32	127*5
	53	-102	450	450	450	6.71	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	11.2	32	127*5
	54	-102	450	450	450	6.71	127*5	19.2	4.3	4.3	104	104	150	0.48	11.2	32	127*5
	116	119	520	520	520	3.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	6.21	32	127*5
	117	118	520	520	520	3.69	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	6.16	32	127*5
	118	102	520	520	520	3.19	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	5.32	32	127*5
	119	103	520	520	520	3.22	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	5.38	32	127*5
	120	87	520	520	520	2.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	4.54	32	127*5
	121	87	520	520	520	2.72	127*5	19.2	4.3	4.3	120	120	400	1	4.54	32	127*5

Рисунок 44 – Таблица подбора сечений.

Максимальный прогиб фермы составляет – 82 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 1 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.45).

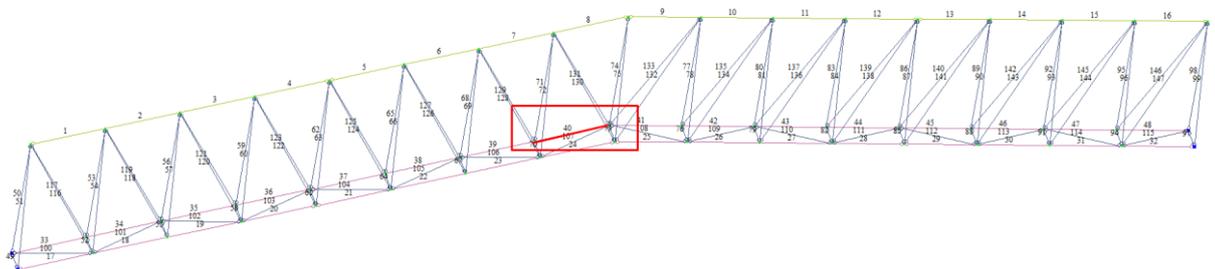


Рисунок 45 – Определение самого напряженного стержня 1 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 1-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.46).

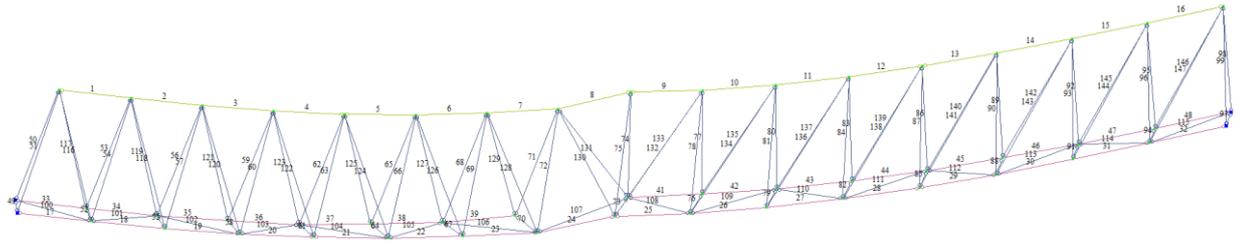


Рисунок 46- Деформационная схема конструкции при разрушении на 1-й

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.47).

Сводная таблица подбора сечения стержней фермы																		
Элемент	№	Расчётное усилие N кН	Длина стержня			Требуемая площадь сечения A _{тр} , см ²	Сечение	Площадь сечения A, см ²	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение σ (кН/см ²)	R _y кН/см ²	Принятое сечение	
			l (см)	l _x (см)	l _y (см)				i _x	i _y	λ _x	λ _y	[λ]					
Верхний пояс	4	-442	300	300	300	17.266	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	10.991	32	325*5	
	5	-506	300	300	300	19.766	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	12.582	32	325*5	
	6	-554	300	300	300	21.641	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	13.776	32	325*5	
	7	-571	300	300	300	22.305	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.198	32	325*5	
	8	-589	300	300	300	23.008	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.646	32	325*5	
	9	-590	300	300	300	23.047	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.671	32	325*5	
	10	-580	300	300	300	22.656	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.422	32	325*5	
	11	-553	300	300	300	21.602	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	13.751	32	325*5	
	12	-506	300	300	300	19.766	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	12.582	32	325*5	
	13	-442	300	300	300	17.266	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	10.991	32	325*5	
	Нижний пояс	25	486	300	300	300	15.188	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.091	32	159*5
		26	437	300	300	300	13.656	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	18.065	32	159*5
		17	434	300	300	300	13.563	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	17.941	32	159*5
18		431	300	300	300	13.469	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	17.817	32	159*5	
19		505	300	300	300	15.781	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.876	32	159*5	
20		487	300	300	300	15.219	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.132	32	159*5	
21		543	300	300	300	16.969	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	22.447	32	159*5	
22		506	300	300	300	15.813	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.918	32	159*5	
23		540	300	300	300	16.875	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	22.323	32	159*5	
24		513	300	300	300	16.031	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	21.207	32	159*5	

Рисунок 47 – Таблица подбора сечений после 1-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 153 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 2 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.48).

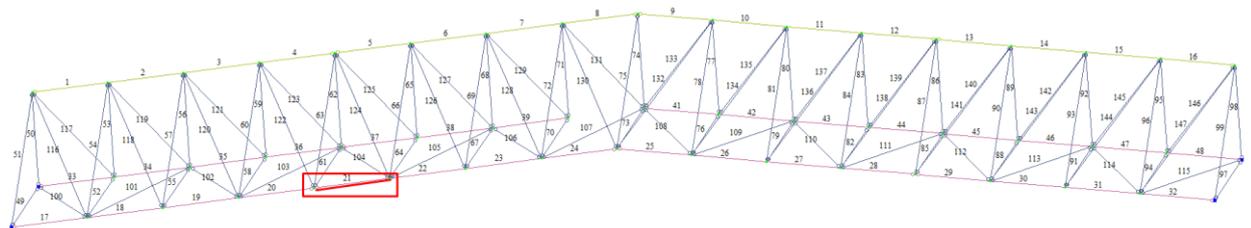


Рисунок 48 – Определение самого напряженного стержня 2 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 2-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.49).

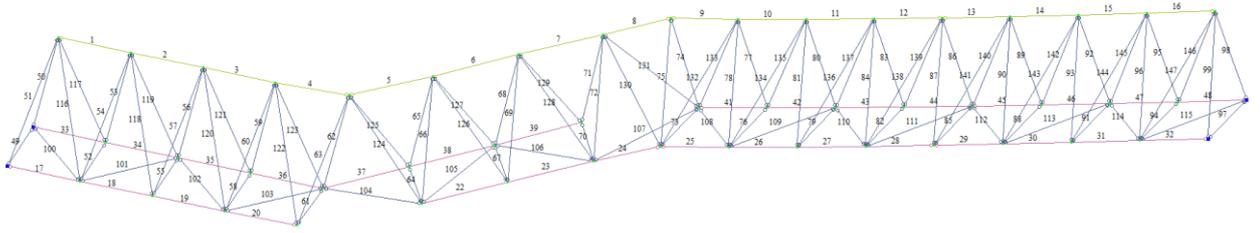


Рисунок 49- Деформационная схема конструкции при разрушении на 2-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.50).

Элемент	№	Расчётное усилие	Длина на стержне			Требуемая площадь	Сечение	Площадь сечения	Радиус инерции				Гибкости			φ	Напряжённость	Ry	Принятая сечение
			l (см)	lx (см)	ly (см)				ix	iy	λx	λy	[λ]						
Верхний пояс	4	-441	300	300	300	17.227	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	10.966	32	325*5		
	5	-502	300	300	300	19.609	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	12.483	32	325*5		
	6	-564	300	300	300	22.031	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.024	32	325*5		
	7	-523	300	300	300	20.43	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	13.005	32	325*5		
	8	-580	300	300	300	22.656	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.422	32	325*5		
	9	-589	300	300	300	23.008	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.646	32	325*5		
	10	-579	300	300	300	22.617	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	14.397	32	325*5		
	11	-552	300	300	300	21.563	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	13.726	32	325*5		
	12	-506	300	300	300	19.766	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	12.582	32	325*5		
	13	-442	300	300	300	17.266	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	10.991	32	325*5		
	14	-358	300	300	300	13.984	325*5	50.27	11.32	11.32	26.502	26.502	120	0.8	8.9019	32	325*5		
	Нижний пояс	41	301	300	300	300	9.4063	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	12.443	32	159*5	
		24	432	300	300	300	13.5	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	17.859	32	159*5	
		37	374	300	300	300	11.688	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	15.461	32	159*5	
40		300	300	300	0	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	0	32	159*5			
Раскосы	66	-309	150	450	450	12.07	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	20.159	32	127*5		
	71	394	400	450	450	12.313	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	20.564	32	127*5		
	72	-328	150	450	450	12.813	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	21.399	32	127*5		
	74	-351	150	450	450	13.711	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	400	0.8	22.899	32	127*5		
	75	350	400	450	450	10.938	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	400	1	18.267	32	127*5		
	123	391	400	425	425	12.219	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	20.407	32	127*5		
	124	353	400	425	425	11.031	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	18.424	32	127*5		
	128	346	400	425	425	10.813	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	18.058	32	127*5		
	129	-445	150	425	425	17.383	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	29.032	32	127*5		
	130	-317	150	425	425	12.383	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	20.681	32	127*5		
131	459	400	425	425	14.344	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	23.956	32	127*5			

Рисунок 50 – Таблица подбора сечений после 2-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 733 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 3 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.51).

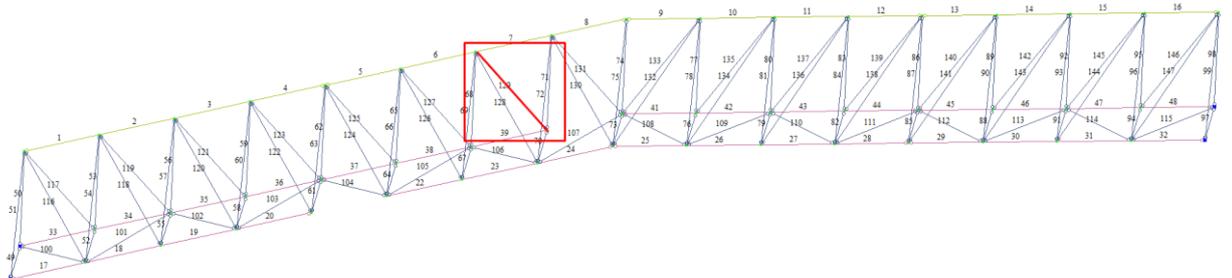


Рисунок 51 – Определение самого напряженного стержня 2 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 3-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.52).

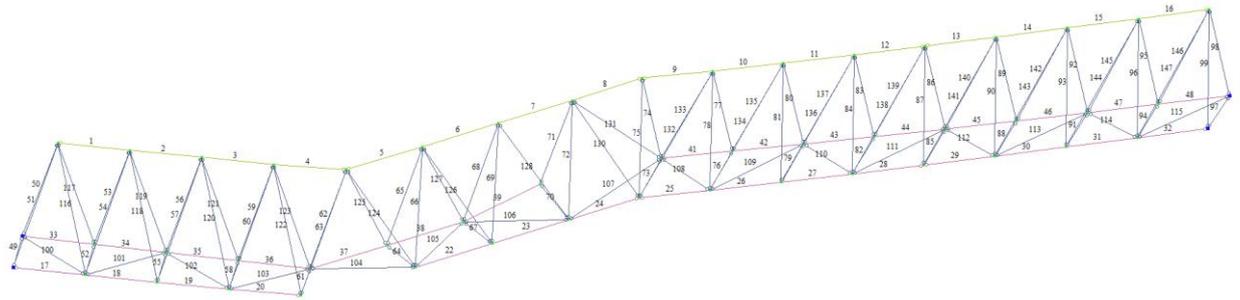


Рисунок 52- Деформационная схема конструкции при разрушении на 3-й стадии

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.53).

Элемент	№	Расчётное усилие	Длина на стержне			Глубокая площадь	Сечение	Площадь сечения	Радиус инерции		Гибкости			φ	Напряжение	R _y кН/см ²	Принятое сечение
			l (см)	l _x (см)	l _y (см)				i _x	i _y	λ _x	λ _y	[λ]				
Верхний пояс	4	-441	300	300	300	17.2266	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	10.9658	32	325*5
	5	-508	300	300	300	19.8438	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	12.6318	32	325*5
	6	-531	300	300	300	20.7422	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	13.2037	32	325*5
	7	-541	300	300	300	21.1328	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	13.4524	32	325*5
	8	-582	300	300	300	22.7344	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	14.4719	32	325*5
	9	-589	300	300	300	23.0078	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	14.6459	32	325*5
	10	-579	300	300	300	22.6172	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	14.3973	32	325*5
	11	-552	300	300	300	21.5625	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	13.7259	32	325*5
Нижний пояс	12	-506	300	300	300	19.7656	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	12.5821	32	325*5
	13	-442	300	300	300	17.2656	325*5	50.27	11.32	11.32	26.5018	26.5018	120	0.8	10.9907	32	325*5
	25	486	300	300	300	15.1875	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	20.0909	32	159*5
	26	437	300	300	300	13.6563	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	18.0653	32	159*5
	22	344	300	300	300	10.75	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	14.2208	32	159*5
	23	339	300	300	300	10.5938	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	14.0141	32	159*5
	24	482	300	300	300	15.0625	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	19.9256	32	159*5
	37	306	300	300	300	9.5625	159*5	24.19	5.45	5.45	55.0459	55.0459	400	1	12.6499	32	159*5
Раскосы	62	-490	150	450	450	19.1406	127*5	19.16	4.32	4.32	104.167	104.167	150	0.8	31.9676	32	127*5
	63	368	400	450	450	11.5	127*5	19.16	4.32	4.32	104.167	104.167	150	1	19.2067	32	127*5
	122	-418	150	425	425	16.3281	127*5	19.16	4.32	4.32	98.3796	98.3796	400	0.8	27.2704	32	127*5
	123	561	400	425	425	17.5313	127*5	19.16	4.32	4.32	98.3796	98.3796	400	1	29.2797	32	127*5
	124	309	400	425	425	9.65625	127*5	19.16	4.32	4.32	98.3796	98.3796	400	1	16.1273	32	127*5
	130	-354	150	425	425	13.8281	127*5	19.16	4.32	4.32	98.3796	98.3796	400	0.8	23.095	32	127*5
131	473	400	425	425	14.7813	127*5	19.16	4.32	4.32	98.3796	98.3796	400	1	24.6868	32	127*5	

Рисунок 53 – Таблица подбора сечений после 3-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 917 мм.

Далее, моделирую прогрессирующее разрушение 4 стадии: удаляю наиболее нагруженный стержень из работы (рис.54).

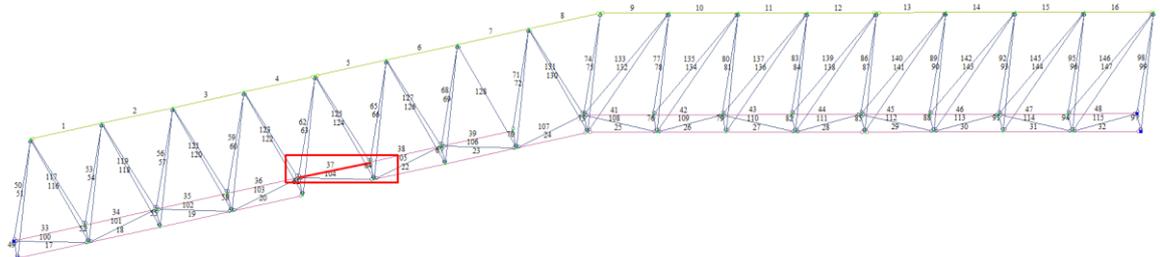


Рисунок 54 – Определение самого напряженного стержня 4 стадии разрушения.

- Произвожу статический расчет 4-й стадии аварийного обрушения. Деформационная схема фермы (рис.55).

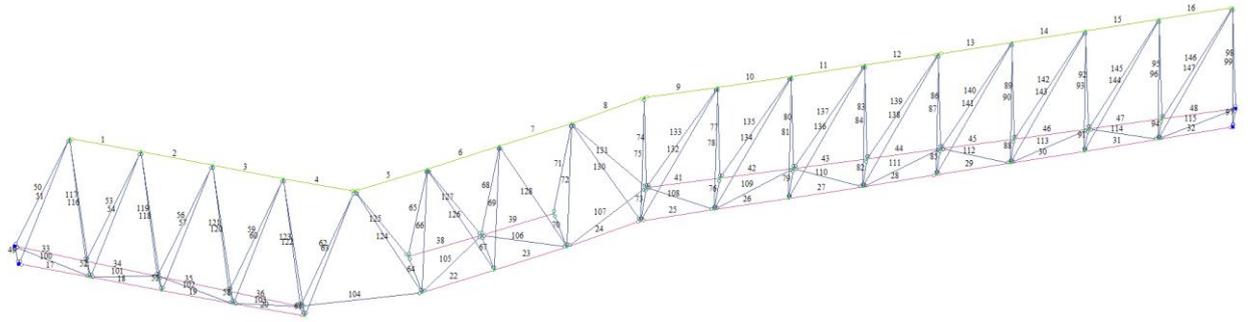


Рисунок 55- Деформационная схема конструкции при разрушении на 4-й стадии.

В результате изменения расчётной схемы. У нас изменились расчётные усилия. Производим повторный расчёт в табличной форме (рис.56).

		41	319	300	300	300	9.9688	129*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	13.187	32	129*5
		42	553	300	300	300	17.281	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	22.861	32	159*5
		44	496	300	300	300	15.5	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.504	32	159*5
	Нижний пояс	46	399	300	300	300	12.469	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	16.494	32	159*5
		20	402	300	300	300	12.563	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	16.618	32	159*5
		22	490	300	300	300	15.313	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	20.256	32	159*5
		24	697	300	300	300	21.781	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	28.814	32	159*5
		40		300	300	300	0	159*5	24.19	5.45	5.45	55.046	55.046	400	1	0	32	159*5
		50	-518	150	450	450	20.234	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	33.794	32	127*5
		51	301	400	450	450	9.4063	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	15.71	32	127*5
		53	-501	150	450	450	19.57	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	32.685	32	127*5
		54	302	400	450	450	9.4375	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	15.762	32	127*5
		56	-495	150	450	450	19.336	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	32.294	32	127*5
		59	-458	150	450	450	17.891	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	29.88	32	127*5
		60	315	400	450	450	9.8438	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	16.441	32	127*5
		62	-676	150	450	450	26.406	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	44.102	32	127*5
		63	562	400	450	450	17.563	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	29.332	32	127*5
		68	-533	150	450	450	20.82	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	0.8	34.773	32	127*5
		69	455	400	450	450	14.219	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	150	1	23.747	32	127*5
		74	-372	150	450	450	14.531	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	400	0.8	24.269	32	127*5
		75	370	400	450	450	11.563	127*5	19.16	4.32	4.32	104.17	104.17	400	1	19.311	32	127*5
		100	384	400	425	425	12	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	150	1	20.042	32	127*5
		101	-383	425	425	425	14.961	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	24.987	32	127*5
		102	406	400	425	425	12.688	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	21.19	32	127*5
	Раскосы	103	-342	150	425	425	13.359	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	22.312	32	127*5
		104	519	400	425	425	16.219	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	27.088	32	127*5
		105	-318	150	425	425	12.422	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	20.746	32	127*5
		106	465	400	425	425	14.531	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	24.269	32	127*5
		116	-347	150	425	425	13.555	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	22.638	32	127*5
		117	580	400	425	425	18.125	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	30.271	32	127*5
		118	-366	150	425	425	14.297	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	23.878	32	127*5
		119	571	400	425	425	17.844	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	29.802	32	127*5
		120	-359	150	425	425	14.023	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	23.421	32	127*5
		121	527	400	425	425	16.469	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	27.505	32	127*5
		122	-640	150	425	425	25	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	41.754	32	127*5
		123	782	400	425	425	24.438	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	40.814	32	127*5
		125	342	400	425	425	10.688	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	17.85	32	127*5
		126	-486	150	425	425	18.984	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	31.707	32	127*5
		127	610	400	425	425	19.063	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	31.837	32	127*5
		130	-798	150	425	425	31.172	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	0.8	52.062	32	127*5
		131	942	400	425	425	29.438	127*5	19.16	4.32	4.32	98.38	98.38	400	1	49.165	32	127*5

Рисунок 56– Таблица подбора сечений после 4-й стадии разрушения.

Максимальный прогиб фермы составляет – 2 000 мм.

После 4 стадии разрушения многие элементы начинают разрушаться. Так как их напряжение превышает предельно допустимое. Данный вид фермы не получилось стабилизировать. Так же стоит отметить, что элементы верхнего пояса являются ключевыми и их вывод из строя приводит к мгновенному разрушению.

3. Вывод

В результате сравнения работы 3-х видов большепролетных ферм при локальном разрушении, можно сделать вывод, что в среднем фермы выдерживают 4 локальных разрушения, что безусловно является хорошим результатом. Так же стоит отметить, что в ферме №2, благодаря системе раскосов, мы получили стабилизацию вертикальных перемещений. Однако, анализ показал, что при приложении эксплуатационной нагрузки на верхний пояс и подбора сечений по первой группе предельных состояний с небольшим запасом прочности, первым из строя выходит элемент верхнего пояса, что приводит к неизбежному разрушению фермы. На основе данного опыта, мы пришли к выводу, что пояс, к которому будет прикладываться нагрузка, должен состоять из нескольких граней, что приведет к возможности подбора сечений с минимальным запасом и взаимозамещению ключевых несущих элементов при локальном разрушении стрелы верхнего пояса, в связи с этим будет увеличена живучесть конструкции.

Библиографический список

1. И.Б. Лузенина, А.А. Дряхлов. Методические указания расчет конструкции большепролетной призматической фермы. Г. Екатеринбург УрГУПС – 2019 – 28с.
2. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town. – MSO, 1968 (ЦИНИС, перевод 18736).
3. Ю.М. Стругацкий. Обеспечение прочности панельных зданий при локальных разрушениях их несущих конструкций. Сб.: Исследования несущих бетонных и железобетонных конструкций сборных многоэтажных зданий. – М.: МНИИТЭП, 1980, с. 3-19.
4. 4.Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях». Г.И. Шапиро, В.С. Коровкин, Ю.А. Эйсман, Ю.М. Стругацкий. – М.: Москомархитектуры, 2002.
5. Еремеев П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях. – Строительная механика и расчет сооружений, №2, 2006, с. 65-72.
6. МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». – М.: НИЦ «Строительство», 2008.
7. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях// Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – №4. – С. 5-9.

Об Авторах

Губа Наталья Валерьевна – студент, e-mail: natasha.guba.1996@gmail.com

Быстров Никита Сергеевич – студент, e-mail: bystrov_nikita97@mail.ru