

УДК 691.714.122

## ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ПЕРЕКРЕСТНО- СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ И ПЛОСКИХ ФЕРМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ МЕТАЛЛОЁМКОСТИ

Стафеев Э.А., студент гр. СПбп-141, IV курс  
Белова Е.М., к.т.н., доцент  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф.Горбачева  
г.Кемерово

Для перекрытия зданий, занимающих большие площади и имеющих значительные пролеты, принимаются, как правило, пространственные конструкции покрытия. В данной статье рассматриваются 2 варианта покрытия здания размерами 48×48м:

- первый вариант предусматривает применение перекрестно-стержневой системы;
- во втором варианте принято сочетание плоских стропильных и подстропильных ферм.

Целью расчета является сравнение металлоёмкости конструкций покрытия по указанным вариантам.

Для расчета перекрестно-стержневой системы (структуры) выбрана расчетная схема, представленная двумя равными группами плоских ферм, перпендикулярных друг другу, причем в отличие от поясов раскосы принадлежат сразу двум взаимно-перпендикулярным фермам (схема "а", рис.1) Кроме этого группы параллельных ферм можно представить как балку (или ферму) на двух опорах, сведя распределение нагрузок с площади кровли поровну на две взаимно-перпендикулярные балки (фермы) (схема "б", рис.1). Следовательно нагрузка от кровли делится пополам между двумя взаимно-перпендикулярными группами ферм, где каждая ферма несет равную нагрузку. При этом пояса всех ферм являются равными и находятся в решении плоской фермы. Раскосы же, участвуя в работе двух взаимно-перпендикулярных ферм и находясь под углом 45° относительно поясов, решаются геометрическим ссумированием сил в решетке плоских взаимно-перпендикулярных ферм.



Рис.1. Схемы приведения структуры к плоской расчетной схеме: а - структура, как 2 группы взаимно-перпендикулярных ферм, б - взаимно-перпендикулярные фермы.

Для дальнейших расчетов принята структура высотой 2,12м из стержней длиной 3м трубчатого сечения.

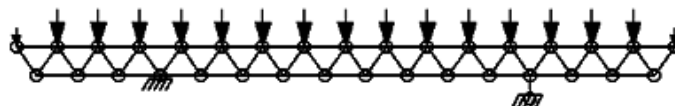


Рис.2. Расчетная схема для определения сил в стержнях условно плоской фермы.

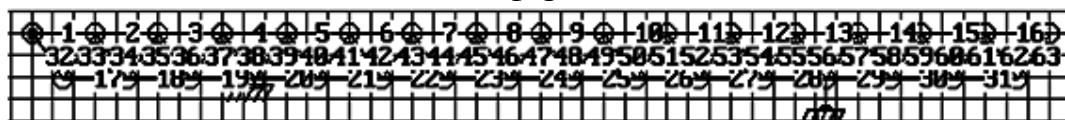


Рис.3. Схема нумерации стержней.

Таблица 1

Определение продольных сил в стержнях параллельных групп ферм

Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N
1	152,8	17	-305,7	33	264,6	49	264,6
2	764,2	18	-1222,6	34	-793,8	50	-793,8
3	1986,8	19	-2750,9	35	793,8	51	793,8
4	3820,8	20	-2445,3	36	-1323,0	52	-1323,0
5	1375,5	21	-305,7	37	1323,0	53	1323,0
6	-458,5	22	1222,6	38	-1852,2	54	-1852,2
7	-1681,1	23	2139,6	39	-2381,4	55	1852,2
8	-2292,5	24	2445,3	40	1852,2	56	-2381,4
9	-2292,5	25	2445,3	41	-1852,2	57	-1852,2
10	-1681,1	26	1222,6	42	1323,0	58	1323,0
11	-458,5	27	-305,7	43	-1323,0	59	-1323,0
12	1375,5	28	-2445,3	44	793,8	60	793,8
13	3820,8	29	-2750,9	45	-793,8	61	-793,8
14	1986,8	30	-1222,6	46	264,6	62	264,6
15	764,2	31	-305,7	47	-264,6	63	-264,6
16	152,8	32	-264,6	48	-264,6		

Таблица 2

Расчет металлоёмкости структуры из труб

С / Р	№	Сила с табл, кН	Сила N, кН	R(мм), t(мм)	I, см4	A, см2	i, см	$\lambda$ <120(с) <400(р)	$\phi$	Nult раст	Nult сжат	N/Nult раст	N/Nult сжат	m, кг/м	m, кг	Кол-во	M, кг
В е р х	Р 1	152.8	8.99	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.074		4	12	68	816
	Р 2	764.2	44.95	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.368		4	12	68	816
	Р 3	1986.8	116.87	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.957		4	12	68	816
	Р 4	3820.8	224.75	108; 3	136.5	9.9	3.7	80.796		237.6		<b>0.946</b>		7.77	23.3	68	1585.1
	Р 5	1375.5	80.91	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.662		4	12	68	816
	С 6	458.5	26.97	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.328	5.4	16.2	68	1101.6
	С 7	1681.1	98.89	83; 3	60.4	7.54	2.8	106	0.57		102.8		<b>0.962</b>	5.92	17.8	68	1207.7
	С 8	2292.5	134.85	95; 3	97.33	9.23	3.2	92.384	0.67		148.6		<b>0.908</b>	7.24	21.7	68	1477
Н и з	С 17	305.7	19.11	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.232	5.4	16.2	64	1036.8
	С 18	1222.6	76.41	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		<b>0.928</b>	5.4	16.2	64	1036.8
	С 19	2750.9	171.93	108; 3	136.5	9.9	3.7	80.796	0.76		179.4		<b>0.958</b>	7.77	23.3	64	1491.8
	С 20	2445.3	152.83	102; 3	114.3	9.33	3.5	85.704	0.72		161.4		<b>0.947</b>	7.32	22	64	1405.4
	С 21	305.7	19.11	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.232	5.4	16.2	64	1036.8
	Р 22	1222.6	76.41	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.626		4	12	64	768
	Р 23	2139.6	133.73	63,5; 3	26.15	5.7	2.1	140.06		136.8		<b>0.978</b>		4.48	13.4	64	860.16
	Р 24	2445.3	152.83	73; 3	40.48	6.6	2.5	121.14		158.4		<b>0.965</b>		5.18	15.5	32	497.28

Продолжение таблицы 2

С	1	-210.45	127; 3	224.8	11.69	4.4	68.419	0.83		233.1		<b>0.903</b>	9.17	27.5	4	110.04
С	2	-187.08	114; 3	161.2	10.46	3.9	76.41	0.78		196.9		<b>0.95</b>	8.21	24.6	16	394.08
С	3	-163.71	108; 3	136.5	9.9	3.7	80.796	0.76		179.4		<b>0.912</b>	7.77	23.3	32	745.92
С	4	-140.31	95; 3	97.33	9.23	3.2	92.384	0.67		148.6		<b>0.944</b>	7.24	21.7	40	868.8
С	5	-116.94	89; 3	75.02	8.11	3	98.638	0.62		121.3		<b>0.964</b>	6.36	19.1	64	1221.1
Р	С 6	-93.55	83; 3	60.4	7.54	2.8	106	0.57		102.8		<b>0.91</b>	5.92	17.8	80	1420.8
е	С 7	-70.16	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.853	5.4	16.2	96	1555.2
ш	С 8	-46.78	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.568	5.4	16.2	112	1814.4
е	С 9	-23.39	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0.284	5.4	16.2	120	1944
Т	С 10	0.00	76; 3	45.91	6.88	2.6	<b>116.13</b>	0.5		82.3		0	5.4	16.2	112	1814.4
к	Р 11	23.39	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.191		4	12	96	1152
а	Р 12	46.78	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.383		4	12	80	960
	Р 13	70.16	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.574		4	12	64	768
	Р 14	93.55	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		0.766		4	12	48	576
	Р 15	116.94	<b>57; 3</b>	18.61	5.09	1.9	156.89		122.2		<b>0.957</b>		4	12	32	384
	Р 16	140.31	70; 3	35.5	6.31	2.4	126.48		151.4		<b>0.927</b>		4.96	14.9	16	238.08
	Р 17	163.71	76; 3	45.91	6.88	2.6	116.13		165.1		<b>0.991</b>		5.4	16.2	12	194.4
															<b>2048</b>	<b>32930</b>

Далее рассмотрим вариант покрытия из плоских ферм, где нагрузка последовательно передается от стропильных ферм к подстропильным (рис.4).



Рис.4. Схема покрытия из плоских ферм

Расчетная схема стропильной фермы принята аналогичной расчетной схеме структуры (рис.2). С целью чистоты эксперимента сравнения металлоёмкости конструкций запроектирована высота фермы, равная высоте структуры - 2,12м, с длиной раскоса - 2,6м. Стропильные фермы выполнены из парных прокатных уголков, а подстропильные - из прокатных парных уголков и прокатных двутавров. Пояса ферм раскреплены горизонтальными связями через 6м, а в плоскости ферм применены решетчатые крепления с шагом 3м.

Таблица 3

Расчет продольных сил в стержнях стропильной фермы

Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N
1	19,2	17	-38,2	33	33,1	49	33,1
2	95,5	18	-152,8	34	-99,2	50	-99,2
3	248,3	19	-343,9	35	99,2	51	99,2
4	477,6	20	-305,7	36	-165,4	52	-165,4
5	171,9	21	-38,2	37	165,4	53	165,4
6	-57,3	22	152,8	38	-231,5	54	-231,5
7	-218,1	23	267,5	39	-297,7	55	231,5
8	-286,6	24	305,7	40	231,5	56	-297,7
9	-286,6	25	267,5	41	-231,5	57	-231,5
10	-210,1	26	152,8	42	165,4	58	165,4
11	-57,3	27	-38,2	43	-165,4	59	-165,4
12	171,9	28	-305,7	44	99,2	60	99,2
13	477,6	29	-343,9	45	-99,2	61	-99,2
14	248,3	30	-152,8	46	33,1	62	33,1
15	95,5	31	-38,2	47	-33,1	63	-33,1
16	19,1	32	-33,1	48	-33,1		

Таблица 4

**Расчет продольных сил в стержнях подстропильной фермы**

Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N	Стержень	N
1	160,6	18	-642,5	35	278,1	52	-814,0	69	0
2	481,8	19	-1590,6	36	-820,7	53	814,0	70	0
3	1116,5	20	-1281,0	37	820,7	54	-814,0	71	0
4	2064,6	21	-340,7	38	-820,7	55	814,0	72	0
5	810,8	22	599,6	39	-1356,7	56	-1356,7	73	0
6	-129,5	23	913,1	40	814,0	57	-814,0	74	0
7	-756,4	24	1226,5	41	-814,0	58	814,0	75	-642,5
8	-1069,8	25	913,1	42	814,0	59	-814,0	76	-1281,0
9	-1069,8	26	599,6	43	-814,0	60	271,3	77	599,6
10	-756,4	27	-340,7	44	271,3	61	-271,3	78	1226,5
11	-129,5	28	-1281,0	45	-271,3	62	271,3	79	599,6
12	810,8	29	-1590,6	46	271,3	63	-271,3	80	-1281,0
13	2064,6	30	-642,5	47	-271,3	64	0	81	-642,5
14	1116,5	31	-321,2	48	-271,3	65	0		
15	481,8	32	-278,1	49	271,3	66	0		
16	160,6	33	278,1	50	-271,3	67	0		
17	-321,2	34	-278,1	51	271,3	68	0		

Таблица 5

**Расчет металлоёмкости стропильных ферм из парных уголков**

	Уголок	C / P	№ ст.табл	Сила N, кН	I <sub>p</sub> (в), см	I <sub>p</sub> (из), см	№ (см), t (мм)	x <sub>0</sub> , см	I <sub>0</sub> , см <sup>4</sup>	I (в), см <sup>4</sup>	I (из), см <sup>4</sup>	A, см <sup>2</sup>	i (в), см	i (из), см	λ (в) <120(c) <400(p)	λ (из) <120(c) <400(p)	φ (в)	φ (из)	Nult раст, кН	Nult сж (в), кН	Nult сж (из), кН	N/Nult раст	N/Nult сж (в)	N/Nult сж (из)	m, кг/м	m, кг	Кол-во	M, кг
1	P	4	478	300	600	12,5; 9	3,4	327,5	655	686	22	5,5	5,6	54,983	107,45				528			<b>0.9045</b>			17,3	208	18	3736,8
2	C	8	287	300	600	14; 9	3,8	465,7	931,4	969,4	24,7	6,1	6,3	48,873	95,814	0,8	0,51		474,7	305,2		0,6037	<b>0.939</b>		19,4	233	18	4192,6
3	C	19	344	300	600	16; 10	4,3	774,2	1548	1603	31,4	7	7,1	42,741	84,019	0,83	0,59		628,5	442		0,5471	<b>0.7779</b>		24,7	296	18	5328,7
4	P	24	306	300	600	11; 7	3	175,6	351,2	370,4	15,2	4,8	4,9	62,307	121,34				363,6			<b>0.8406</b>			10,1	106	18	1901,3
5	C	32	33,1	208	260	5; 4	1,4	9,21	18,42	21,59	3,89	2,2	2,4	95,586	<b>110.37</b>	0,52	0,43		48,15	40,59		0,6871	<b>0.815</b>		3,05	7,9	18	142,74
6	P	33	33,1	208	260	2,5; 3	0,7	0,81	1,62	2,559	1,43	1,1	1,3	195,42	194,36				34,32			<b>0.9639</b>			1,12	2,9	18	52,416
7	C	34	9,23	208	260	5; 4	1,4	9,21	18,42	21,59	3,89	2,2	2,4	95,586	<b>110.37</b>	0,52	0,43		48,15	40,59		0,1917	0,2274		3,05	7,9	18	142,74
8	P	35	9,23	208	260	<b>2; 3</b>	0,6	0,4	0,8	1,509	1,13	0,8	1,2	247,21	225,01				27,12			0,3403			0,89	2,3	18	41,652
9	C	36	165	208	260	9; 6	2,4	82,1	164,2	175,9	10,6	3,9	4,1	52,873	63,853	0,78	0,71		198	181,4		0,8353	<b>0.9115</b>		8,33	22	18	389,84
10	P	37	165	260	260	7,5; 5	2	39,53	79,06	86,34	7,39	3,3	3,4	79,491	76,064				177,36			<b>0.9325</b>			5,8	15	18	271,44
11	C	38	232	260	260	10; 7	2,7	130,6	261,2	277,5	13,8	4,4	4,5	59,656	57,872	0,74	0,75		243,5	247		<b>0.9508</b>	<b>0.9373</b>		10,8	28	18	504,97
12	C	39	298	208	260	12,5; 9	3,4	327,5	655	686	22	5,5	5,6	38,121	46,561	0,86	0,81		452,6	429,1		0,6578	<b>0.6937</b>		17,3	45	18	809,64
13	P	40	232	208	260	9; 6	2,4	82,1	164,2	175,9	10,6	3,9	4,1	52,873	63,853				254,64			<b>0.9092</b>			8,33	22	18	389,84
14	C	41	232	208	260	10; 7	2,7	130,6	261,2	277,5	13,8	4,4	4,5	47,725	57,872	0,81	0,75		266,1	247		0,8701	<b>0.9373</b>		10,8	28	18	504,97
15	P	42	165	208	260	7,5; 5	2	39,53	79,06	86,34	7,39	3,3	3,4	63,593	76,064				177,36			<b>0.9325</b>			5,8	15	18	271,44
16	C	43	165	208	260	9; 6	2,4	82,1	164,2	175,9	10,6	3,9	4,1	52,873	63,853	0,78	0,71		198	181,4		0,8353	<b>0.9115</b>		8,33	22	18	389,84
17	P	44	9,23	208	260	<b>2; 3</b>	0,6	0,4	0,8	1,509	1,13	0,8	1,2	247,21	225,01				27,12			0,3403			0,89	2,3	18	41,652
18	C	45	9,23	208	260	5; 4	1,4	9,21	18,42	21,59	3,89	2,2	2,4	95,586	<b>110.37</b>	0,52	0,43		48,15	40,59		0,1917	0,2274		3,05	7,9	18	142,74
19	P	46	33,1	208	260	2,5; 3	0,7	0,81	1,62	2,559	1,43	1,1	1,3	195,42	194,36				34,32			<b>0.9639</b>			1,12	2,9	18	52,416
20	C	47	33,1	208	260	5; 4	1,4	9,21	18,42	21,59	3,89	2,2	2,4	95,586	<b>110.37</b>	0,52	0,43		48,15	40,59		0,6871	0,815		3,05	7,9	18	142,74
																										360	19451	

Таблица 6

Расчет металлоёмкости подстропильных ферм из парных уголков и двутавров

	Уголок	С / P	№ с табл	Сила N, кН	l <sub>p</sub> (в), см	l <sub>p</sub> (из), см	№ (см), t (мм)	x0, см	l <sub>0</sub> , см4	l (в), см4	l (из), см4	A, см2	i (в), см	i (из), см	λ (в) <120(c) <400(p)	λ (из) <120(c) <400(p)	φ (в)	φ (из)	Nult раст, кН	Nult сж (в), кН	Nult сж (из), кН	N/Nult раст	N/Nult сж (в)	N/Nult сж (из)	m, кг/м	m, кг	Кол-во	M, кг	
Верх	1	P	4	2065	300	600	25; 18	6.8	5247	10494	10740	87.7	11	11	27.428	54.225			2105.3			<b>0.9807</b>			68.9	826	4	3305.3	
	2	C	8	1070	300	600	22; 16	6	3175	6351	6517	68.6	9.6	9.7	31.175	61.548	0.89	0.73		1468	1196		0.7289	<b>0.8946</b>	53.8	646	4	2583.8	
	3	C	19	1591	300	600	25; 18	6.8	5247	10494	10740	87.7	11	11	27.428	54.225	0.91	0.77			1916	1621		0.8304	<b>0.9814</b>	68.9	826	4	3305.3
	4	P	24	1227	300	600	20; 14	5.5	2097	4194	4313	54.6	8.8	8.9	34.23	67.505			1310.4				<b>0.936</b>			42.8	514	4	2054.4
Низ	5	C	32; 34	278	208	260	11; 7	3	175.6	351.2	370.4	15.2	4.8	4.9	43.2	52.582	0.83	0.78		302.1	283.3		0.9207	<b>0.9815</b>	11.9	31	8	247.31	
	6	P	33; 35	278	208	260	10; 7	2.7	130.6	261.2	277.5	13.8	4.4	4.5	47.725	57.872			330				<b>0.8427</b>			10.8	28	8	224.43
	9	C	36; 38	821	260	260	18; 11	4.9	1216	2433	2508	38.8	7.9	8	32.834	32.338	0.88	0.89		822.8	825.1		0.9974	<b>0.9947</b>	30.5	79	8	633.78	
	10	P	37	821	260	260	16; 11	4.4	844.2	1688	1749	34.4	7	7.1	37.123	36.478			826.08				<b>0.9935</b>			27	70	4	281.01
Р	12	C	39	1357	208	260	22; 16	6	3175	6351	6517	68.6	9.6	9.7	21.614	26.671	0.94	0.91		1543	1504		0.8793	<b>0.9024</b>	53.8	140	4	559.83	
	13	P	40; 42	814	208	260	16; 11	4.4	844.2	1688	1749	34.4	7	7.1	29.698	36.478			826.08				<b>0.9854</b>			27	70	8	562.02
	14	C	41; 43	814	208	260	18; 11	4.9	1216	2433	2508	38.8	7.9	8	26.268	32.338	0.92	0.89		852.4	825.1		0.9549	<b>0.9866</b>	30.5	79	8	633.78	
	17	P	44; 46	271	208	260	10; 7	2.7	130.6	261.2	277.5	13.8	4.4	4.5	47.725	57.872			330				<b>0.8221</b>			10.8	28	8	224.43
е	18	C	45; 47	271	208	260	11; 7	3	175.6	351.2	370.4	15.2	4.8	4.9	43.2	52.582	0.83	0.78		302.1	283.3		0.8982	<b>0.9575</b>	11.9	31	8	247.31	
	19	Двутавры стоек для крепления стропильных ферм																									108	229	18
																										98	18984		
																										458	38434		

Таблица 7

Расчет металлоёмкости связей и распорок и металлоёмкости покрытия из плоских ферм

	l <sub>p</sub> в пл-ти, см	l <sub>p</sub> из пл-ти, см	№ (см), t (мм)	x0, см	l <sub>0</sub> , см4	l (в), см4	l (из), см4	A, см2	i (в), см	i (из), см	λ (в) <200	λ (из) <200	Масса уголка, кг/м	Масса стержня, кг	Кол-во	Масса стержней, кг
Горизонт. связи	424	424	5; 4	1.38	9.21	21.59	21.59	3.89	2.36	2.36	180	179.99	3.05	12.932	128	1655.296
Распорки													3.05	18.3	108	1976.4
																3631.696
Итого:																42066.184

Из приведенных результатов расчетов видно, что масса всех элементов покрытия из плоских ферм составила по приближительному расчету 42т, что на 9т больше массы структурного покрытия, составившей 33т. Для данного здания покрытие из плоских ферм оказалось на 27% более металлоёмким, чем структурное. Это значение ниже ожидаемого, т.к. пролет относительно невелик для структурного покрытия, из-за чего множество его стержней были приняты по предельной гибкости и минимальному сечению проката труб, а не по несущей способности. С ростом пролета и/или нагрузки отношение металлоёмкости покрытия из плоских ферм к металлоёмкости структурного покрытия будет стремиться к 2, т.к. в плоских фермах нагрузка последовательно передается от стропильных ферм к подстропильным. Также покрытие из плоских ферм требует устройства системы связей и распорок в покрытии, в структуре же роль связей выполняют ее раскосы.

Структурное покрытие выгодно при больших пролетах, нагрузках и шагах колонн. При малых пролетах, шагах и нагрузках структура будет неэффективна из-за того, что нагрузка будет распределяться на большое количество стержней, которые имея малое сечение, относительно своей длины, будут иметь малый коэффициент устойчивости и большую гибкость, что воспрепятствует подбору малых сечений, полностью использующих свою несущую способность.