



УДК 624.014.072

А.З. Манапов – кандидат технических наук, доцент
 Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СТАЛЬНОЙ СТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИМ ИМИТАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

АННОТАЦИЯ

Статистический имитационный метод – метод расчета конструкции с использованием в качестве исходных параметров интервальных оценок параметров нагрузок, прочностных качеств конструкционных материалов, интервальных оценок расчетного перехода от нагрузок к напряжениям в элементах. Результаты расчета конструкции содержат дополнительную информацию о частоте возможных отказов отдельных элементов конструкции.

A.Z. Manapov – candidate of technical science, associate professor
 Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

TESTING CALCULATION OF STEEL TRUSS FRAMES OF INDUSTRIAL BUILDING BY STATISTICAL SIMULATION METHOD

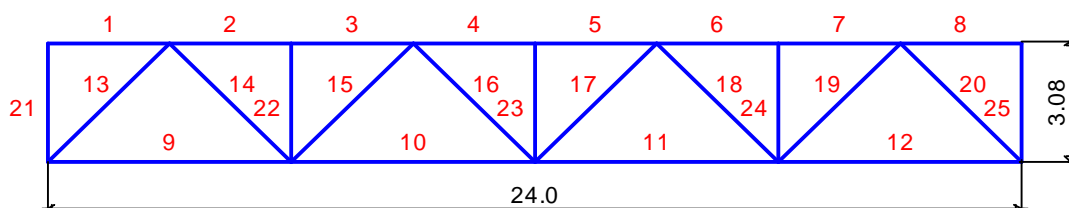
ABSTRACT

Statistical simulation method of design calculation using interval estimations of loading parameters and settlement transition from loadings to pressure in elements, strength qualities of constructional materials as initial parameters is considered. Results of design calculation contain the additional information on frequency of possible refusals of construction separate elements.

При выполнении обследования и проверочных расчетов стропильных стальных ферм производственного здания с использованием действующих норм [1] получились результаты, свидетельствующие о недостаточной несущей способности их элементов для восприятия скорректированных (увеличенных) последними дополнениями расчетных снеговых нагрузок. Рассматриваемое здание эксплуатировалось уже 35 лет, физический износ его несущих конструкций был незначительным, признаки перегрузки конструкций отсутствовали, поэтому напрашивающиеся выводы о необходимости разборки покрытия оказались бы не логичными. В связи с возникшими противоречиями было принято решение разработать статистический имитационный метод расчета надежности конкретно для рассматриваемого случая с дальнейшим использованием его результатов для принятия решений.

Расчет стропильной фермы производственного здания, ориентированной на действующие нормы проектирования стальных конструкций, показал следующие результаты:

- пролет фермы $L = 24,0$ м;
- высота фермы $H = 3,08$ м;
- раскрепления из плоскости: узлы верхнего пояса – все; узлы нижнего пояса – крайние и посередине пролета;
- сечение верхнего пояса – уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L120x12;
- сечение нижнего пояса – уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L80x12;
- сечение раскосов – уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L80x12;
- сечение стоек – уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L70x4;
- сечение опорных раскосов – уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L120x12;





- сталь: С245 – лист 2-20 мм;
- расчетное сопротивление стали $R_y = 2,45 \text{ Т/см}^2$;
- коэффициент надежности по назначению 0,95;
- коэффициенты условий работы: поясов, опорных раскосов, растянутых элементов решетки, сжатых элементов решетки крестового сечения – 0,95; сжатых элементов решетки таврового сечения при гибкости их больше 60 – 0,8.

Загрузка 2 – постоянное, пояс, верхний



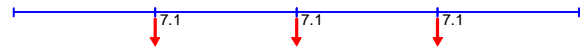
Среднее арифметическое – 5270 кгс,
коэффициент вариации – 0,1

Загрузка 1 – снеговое, пояс верхний



Среднее арифметическое – 2700 кгс,
коэффициент вариации – 0,3

Загрузка 3 – крановое, пояс нижний



Равномерное распределение от 6530 кгс до 7100 кгс

Усилия в элементах фермы
(значения усилий приведены в тоннах)

№ эл.	Комбинации		Загрузки		
	N_{\min}	N_{\max}	1	2	3
Верхний пояс					
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-75,229	-51,911	-24,545	-33,896	-20,747
3	-75,229	-51,911	-24,545	-33,896	-20,747
4	-100,305	-69,214	-32,727	-45,195	-27,662
5	-100,305	-69,214	-32,727	-45,195	-27,662
6	-75,229	-51,911	-24,545	-33,896	-20,747
7	-75,229	-51,911	-24,545	-33,896	-20,747
8	-1,67825e-15	1,81862e-15	-3,68092e-15	-1,10529e-15	3,01963e-15
Нижний пояс					
9	28,639	42,241	14,318	19,773	10,373
10	63,246	92,394	30,682	42,37	24,205
11	63,246	92,394	30,682	42,37	24,205
12	28,639	42,241	14,318	19,773	10,373
Раскосы					
13	-60,54	-41,045	-20,521	-28,338	-14,867
14	33,353	47,278	14,658	20,242	14,867
15	-24,6	-16,246	-8,795	-12,145	-4,956
16	8,554	11,339	2,932	4,048	4,956
17	8,554	11,339	2,932	4,048	4,956
18	-24,6	-16,246	-8,795	-12,145	-4,956
19	33,353	47,278	14,658	20,242	14,867
20	-60,54	-41,045	-20,521	-28,338	-14,867
Стойки					
21	-4,75	-2,755	-2,1	-2,9	0,0
22	-9,5	-5,51	-4,2	-5,8	0,0
23	-9,5	-5,51	-4,2	-5,8	0,0
24	-9,5	-5,51	-4,2	-5,8	0,0
25	-4,75	-2,755	-2,1	-2,9	0,0



Результаты расчета

Проверено по СНиП	Фактор	Коэффициент использования
п. 5.1	прочность верхнего пояса	0,782
п. 5.3	устойчивость верхнего пояса в плоскости фермы	1,163
п. 5.3	устойчивость верхнего пояса из плоскости фермы	0,948
пп. 6.1-6.4, 6.15	гибкость верхнего пояса	0,681
п. 5.1	прочность нижнего пояса	1,11
пп. 6.1-6.4, 6.16	гибкость нижнего пояса	0,626
п. 5.1	прочность раскосов	0,568
п. 5.3	устойчивость раскосов в плоскости фермы	1,171
п. 5.3	устойчивость раскосов из плоскости фермы	0,749
пп. 6.1-6.4, 6.15	гибкость раскосов	0,845
п. 5.1	прочность стоек	0,33
п. 5.3	устойчивость стоек в плоскости фермы	0,862
п. 5.3	устойчивость стоек из плоскости фермы	0,704
пп. 6.1-6.4, 6.15	гибкость стоек	0,965
п. 5.1	прочность опорных раскосов	0,472
п. 5.3	устойчивость опорных раскосов в плоскости фермы	1,084
п. 5.3	устойчивость опорных раскосов из плоскости фермы	0,673
пп. 6.1-6.4, 6.15	гибкость опорных раскосов	0,976
	жесткость фермы	0,445

Расчет с использованием действующих норм [1, 2, 3] дал результаты, свидетельствующие о наличии перегрузки верхнего пояса, опорного и рядовых раскосов по устойчивости в плоскости фермы, нижнего пояса по прочности.

Для расчета стропильной фермы производственного здания статистическим имитационным методом воспользуемся информацией по статистическим характеристикам веса снегового покрова, конструкций, крановой нагрузки и удельного сопротивления конструкционных сталей, содержащейся в пособии [3].

Снеговой район по [1]	Среднее значение веса снегового покрова на 1 м ² горизонтальной поверхности \bar{S}_0 , Па (кгс/м ²)	Коэффициент вариации u_f
IV	1470 (150)	0,30

Нагрузки	Коэффициент вариации u_f
Стальные конструкции	0,025
Асбестоцементные листы, железобетонные плиты	0,05
Подвижные нагрузки	Равномерное распределение
Крановая нагрузка	0,92 – 1,00

Марка стали и вид проката	Толщина листа или полки профиля, мм	Среднее значение предела текучести \bar{s}_y , МПа (кгс/мм ²)	Коэффициент вариации u_m
ВСтЗсп, фасон	4-6	293 (29,9)	0,080
	8-10	292 (29,8)	0,080
	12-16	282 (28,7)	0,051



Определим коэффициенты перехода от нагрузок к усилиям и коэффициенты перехода от усилий к напряжениям в стержневых элементах рассматриваемой стропильной фермы.

Элемент фермы	Нагрузка (т)	Усилие (т)	Коэффициент перехода от нагрузки к усилию, точечная оценка	Коэффициент перехода от нагрузки к усилию, интервальная оценка
Верхний пояс	Постоянная = 5,8	-45,19	-7,79	(от -7,01 до -7,79)
	Снеговая = 4,2	-32,73	-7,79	(от -7,01 до -7,79)
	Крановая = 7,1	-27,67	-3,90	(от -3,51 до -3,90)
Нижний пояс	Постоянная = 5,8	42,37	7,30	(от 6,57 до 7,30)
	Снеговая = 4,2	30,68	7,30	(от 6,57 до 7,30)
	Крановая = 7,1	24,20	3,41	(от 3,07 до 3,41)
Опорный раскос	Постоянная = 5,8	-28,34	-4,89	(от -4,40 до -4,89)
	Снеговая = 4,2	-20,52	-4,89	(от -4,40 до -4,89)
	Крановая = 7,1	-14,87	-2,09	(от -1,88 до -2,09)
Раскос первый сжатый	Постоянная = 5,8	-12,14	-2,09	(от -1,88 до -2,09)
	Снеговая = 4,2	-8,79	-2,09	(от -1,88 до -2,09)
	Крановая = 7,1	-4,96	-0,70	(от -0,63 до -0,70)

Элемент фермы	Формула перехода от усилий к напряжениям и коэффициент в точечной оценке ($1/\text{см}^2$)	Коэффициент перехода от усилий к напряжениям в интервальной оценке ($1/\text{см}^2$)
Верхний пояс	$1/jA=0,0269$ $I = 82$ $j = 0,671$ $A=55,2 \text{ см}^2$	От 0,0261 до 0,0269
Нижний пояс	$1/A=0,0279$ $A=35,8 \text{ см}^2$	От 0,0271 до 0,0279
Опорный раскос	$1/jA=0,0408$ $I = 116$ $j = 0,443$ $A=55,2 \text{ см}^2$	От 0,0395 до 0,0408
Раскос первый сжатый	$1/jA=0,0909$ $I = 142$ $j = 0,307$ $A=35,8 \text{ см}^2$	От 0,0881 до 0,0909

Используя генератор случайных чисел, получим для каждого из расчетных параметров: нагрузок и коэффициентов перехода – по 10000 случайных реализаций, соответствующих их функциям распределений. Используя коэффициенты перехода от нагрузок к усилиям и от усилий к напряжениям, получим по 10000 значений напряжений в расчетном элементе стропильной фермы и сравним каждое из 10000 значений напряжения с каждым из 10000 значений удельного сопротивления стали (предела текучести).

Каждый случай превышения напряжения в элементе стропильной фермы соответствующего значения предела текучести будет определяться как случай перегрузки этого элемента.

Числовые значения реализаций, полученных с помощью генератора случайных чисел (первые 30 значений для верхнего пояса стропильной фермы), приведены ниже.



Постоянная нагрузка (кгс)	Снеговая нагрузка (кгс)	Крановая нагрузка (кгс)	Коэфф-т перехода от постоянной и снеговой нагрузок к усилию	Коэфф-т перехода от крановой нагрузки к усилию	Коэфф-т перехода от усилий к напряжениям (1/см ²)	Напряжения (кгс/см ²)	Удельное сопротивление стали (кгс/см ²)
1	2	3	4	5	6	7	8
5102	1215	6730	7,7384	3,7557	0,0268	1986	3029
4652	2616	6888	7,0990	3,7041	0,0263	2026	2558
5124	2182	6837	7,0103	3,6970	0,0263	2011	2718
4900	2318	6900	7,0112	3,5252	0,0267	1999	2768
5319	2576	6570	7,5517	3,7311	0,0263	2216	2731
4947	2950	6644	7,7864	3,7819	0,0268	2321	2753
4606	3290	6651	7,0482	3,7686	0,0263	2123	2961
4876	1773	6969	7,1916	3,7819	0,0265	1963	2812
4769	647	6737	7,4032	3,6251	0,0266	1718	2726
5033	1987	6589	7,1279	3,6717	0,0264	1960	2963
5107	3272	7027	7,4312	3,8125	0,0265	2358	2865
5048	2454	6827	7,5923	3,7646	0,0264	2183	2923
5365	2230	6755	7,3370	3,6212	0,0266	2130	2566
4883	2483	6937	7,6264	3,7692	0,0262	2155	2959
5304	2251	6694	7,1771	3,8979	0,0269	2160	2847
4706	2423	6750	7,5696	3,5917	0,0263	2058	2751
5092	4185	7027	7,1846	3,7508	0,0262	2435	2866
5019	1826	7027	7,1135	3,7955	0,0265	1999	2872
4477	2826	6850	7,1606	3,6587	0,0261	2022	2838
5157	2880	6945	7,7396	3,8741	0,0266	2373	2940
4850	3922	6619	7,4658	3,8382	0,0263	2389	2993
4422	2504	6931	7,4568	3,7927	0,0262	2039	2860
5112	1741	6661	7,4896	3,8409	0,0268	2064	2865
4416	1494	6914	7,4186	3,8518	0,0267	1883	2890
4957	2592	6634	7,0235	3,8745	0,0266	2098	3079
4993	-24	7057	7,3212	3,8282	0,0263	1665	3071
5564	3101	6535	7,4774	3,5334	0,0265	2332	2931

По результатам расчетов верхнего пояса методом статистического моделирования на 10000 реализаций получено 3 случая перегрузки на 168 кгс/см²; 10 кгс/см² и 2 кгс/см², что соответствует коэффициентам использования несущей способности 1,68; 1,004 и 1,0008, расчет классическим методом дал результат 1,163.

Результаты расчета и числовые значения реализаций, полученных с помощью генератора случайных чисел, для нижнего пояса стропильной фермы приведены в следующей таблице.



Постоянная нагрузка (кгс)	Снеговая нагрузка (кгс)	Крановая нагрузка (кгс)	Коэфф-т перехода от постоянной и снеговой нагрузок к усилию	Коэфф-т перехода от крановой нагрузки к усилию	Коэфф-т перехода от усилий к напряжениям (1/см ²)	Напряжения (кгс/см ²)	Удельное сопротивление стали (кгс/см ²)
1	2	3	4	5	6	7	8
5065	3919	6768	6,7153	3,1532	0,0272	2224	2902
5439	1724	6615	6,6268	3,1082	0,0272	1849	3077
5319	-1	7008	6,6163	3,3953	0,0275	1621	2800
5471	305	7071	7,1198	3,0845	0,0277	1745	2769
4478	3112	6576	7,0847	3,2564	0,0278	2089	2932
4823	4811	6990	6,8660	3,2011	0,0275	2436	2940
4845	1360	6680	6,7742	3,1986	0,0279	1766	2907
5659	2109	6813	6,7880	3,3018	0,0276	2079	3183
5082	2708	7066	6,6527	3,0826	0,0273	2011	2968
4593	1864	6985	6,6911	3,1861	0,0273	1784	2787
5869	2781	6705	7,0712	3,1774	0,0274	2259	3127
5295	3237	6586	6,6328	3,1506	0,0274	2120	2778
5126	2535	6850	6,9421	3,3822	0,0274	2093	2800
5567	3354	6968	6,8261	3,1068	0,0274	2264	3062
4972	2059	6831	6,6117	3,2872	0,0277	1912	2871
5115	3166	6594	6,6072	3,3545	0,0275	2115	2787
5868	2085	6696	7,1718	3,1018	0,0276	2147	2941
5865	1798	7061	6,9061	3,2777	0,0279	2120	2794
5349	1998	6550	6,9518	3,1310	0,0273	1956	2802
5588	3929	6790	6,8655	3,2966	0,0272	2389	2755
4731	2872	6586	6,6468	3,2273	0,0276	1983	2890
5549	2849	6908	7,1569	3,1687	0,0273	2236	2808
4875	2937	6717	6,7853	3,3067	0,0278	2093	2871
5505	2748	6665	7,0058	3,3093	0,0273	2178	2775
4785	988	6733	6,7569	3,3537	0,0278	1710	2821
6027	2493	6705	6,8715	3,4073	0,0276	2244	3110
3933	2904	6828	6,9718	3,1845	0,0273	1893	3012

По результатам расчетов на 10000 реализаций получен 1 случай перегрузки на 43 кгс/см², что соответствует коэффициентам использования несущей способности 1,015, расчет классическим методом дал результат 1,110.

Результаты расчета и числовые значения реализаций, полученных с помощью генератора случайных чисел, для опорного раскоса стропильной фермы приведены ниже.



Постоянная нагрузка (кгс)	Снеговая нагрузка (кгс)	Крановая нагрузка (кгс)	Кoeff-т перехода от постоянной и снеговой нагрузок к усилию	Кoeff-т перехода от крановой нагрузки к усилию	Кoeff-т перехода от усилий к напряжениям (1/см ²)	Напряжения (кгс/см ²)	Удельное сопротивление стали (кгс/см ²)
1	2	3	4	5	6	7	8
4901	2629	6836	4,8602	1,9424	0,0401	1997	2708
4407	1885	7050	4,7395	1,9907	0,0402	1764	2817
5452	1416	6801	4,8442	1,9728	0,0406	1895	2887
4792	4675	6761	4,6829	1,9989	0,0405	2341	2676
4700	1648	6641	4,8518	1,8887	0,0406	1758	2874
5234	1675	6697	4,6155	1,9226	0,0402	1797	2852
5073	2605	6811	4,8231	1,8944	0,0400	1998	2854
4541	3448	6648	4,5293	2,0047	0,0402	1988	2745
4885	2469	6647	4,7619	2,0120	0,0401	1940	2881
5926	2453	6554	4,7501	1,9329	0,0399	2094	3078
5593	3161	6968	4,7944	1,8840	0,0401	2210	3022
5777	1786	6630	4,5592	2,0581	0,0404	1943	2826
6444	1377	6988	4,5742	1,9532	0,0397	1964	2852
5625	1094	6559	4,4484	1,9326	0,0400	1701	3081
5197	3137	6735	4,4207	2,0355	0,0405	2048	3256
5970	3917	6787	4,4755	2,0825	0,0396	2311	2742
5885	3174	6606	4,4517	2,0611	0,0396	2136	2741
5089	2842	6932	4,6703	1,8812	0,0403	2016	2895
5667	594	6620	4,5601	2,0754	0,0401	1695	2857
4898	2518	6935	4,4566	2,0884	0,0407	1935	2955
5079	2888	6872	4,6665	1,9007	0,0407	2043	2858
4778	3253	7075	4,8737	1,8808	0,0398	2089	2702
5333	4077	6702	4,7919	2,0522	0,0400	2356	2909
5199	2510	6561	4,8004	2,0202	0,0407	2043	3040
5635	1013	7019	4,5227	1,8924	0,0400	1734	2744
4721	2352	6808	4,8359	1,9027	0,0400	1884	2873
5262	2257	6704	4,6292	2,0277	0,0406	1963	2784

На 10000 реализаций не получено ни одного случая перегрузки, максимальный коэффициент использования несущей способности равен 0,938, расчет классическим методом дал результат 1,084.

Выводы:

1. Применение статистического имитационного метода расчета конструкции позволяет в качестве исходных параметров использовать интервальные оценки параметров нагрузок, прочностных качеств конструкционных материалов, учитывать интервальные оценки расчетного перехода от нагрузок к напряжениям в элементах.

2. Результаты статистического имитационного метода расчета конструкции содержат дополнительную информацию о частоте возможных отказов отдельных элементов конструкции.

Литература

1. СНИП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2003. – 36 с.
2. ГОСТ 27751-88 (с изм. 1.1999) Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. – 8 с.
3. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНИП II-23-81* «Стальные конструкции»). // ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.