

Прогрестех-Дубна



- ▣ Прогрестех-Дубна - центр консалтинга и инжиниринга в области авиастроения и технологий аэропортов, созданный в 2006 году в Дубне Московской области. Компания получила статус резидента особой экономической зоны технико-внедренческого типа «Дубна» в октябре 2007 года.

Деятельность Прогрестех-Дубна:

- ▣ Консалтинг в авиастроении – комплекс консультационных услуг по подготовке и обеспечению выполнения инжиниринговых проектов разработчиков и производителей авиационной техники, включая анализ прочности, проектирование элементов конструкций и технологическую поддержку производства.
- ▣ Проектирование аэропортов и инфраструктур – разработка полного пакета проектной документации для строительства и реконструкции объектов наземной инфраструктуры гражданской авиации и других зданий и сооружений.
- ▣ Текущие проекты: Airbus A350, A319-100 PAX, A319 CJ, Aero Composite Sukhoi SSJ 100.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЗДУХОВОДА ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Работа сводилась к разработке программного продукта подбора оптимальных сечений. Подкрепляющий набор должен обеспечить прочность и жесткость элементов конструкции при минимальном весе с допустимым запасом прочности.

На первом этапе производился итерационный расчет набора сечений при помощи плоской балочной КЭ модели с учетом аналитической модели устойчивости. Для воздуховода сечение теоретического контура переменное по длине, соответственно используется множество локальных балочных КЭ моделей.

На втором этапе производится расчет при помощи общей КЭ модели. Оценивается НДС и устойчивость, при необходимости вводятся корректировки в конструкцию.

В среде MSC.Patran реализована модель воздуховода авиационной конструкции, разбитая плоскостями с шагом 70 мм.

С целью получения массивов узловых координат кривые, образованные сечениями воздуховода, разбиваются на узлы с определенным шагом. Количество узлов локальных балочных КЭ моделей постоянно по длине конструкции.

Далее координаты узлов теоретического контура переносятся в Microsoft Excel где происходит разделение общего массива на группы узлов с последовательным расположением по цепочке.

1				2				3				4				5			
Node_ID	x	y	z	Node_ID	x	y	z	Node_ID	x	y	z	Node_ID	x	y	z	Node_ID	x	y	z
1	195.2527	-174.008	-2600	1	193.6227	-173.268	-2670	1	188.7622	-171.085	-2740	1	180.7729	-167.539	-2810	1	169.8381	-162.777	-2880
2	190.9315	-182.844	-2600	2	189.3302	-182.124	-2670	2	184.5552	-179.997	-2740	2	176.7075	-176.544	-2810	2	165.9693	-171.909	-2880
3	186.2106	-191.474	-2600	3	184.6384	-190.775	-2670	3	179.9508	-188.71	-2740	3	172.2485	-185.361	-2810	3	161.714	-180.867	-2880
4	181.1	-199.878	-2600	4	179.5563	-199.203	-2670	4	174.9574	-197.207	-2740	4	167.4035	-193.972	-2810	4	157.0783	-189.634	-2880
5	175.6103	-208.04	-2600	5	174.096	-207.39	-2670	5	169.5861	-205.469	-2740	5	162.1821	-202.359	-2810	5	152.0698	-198.194	-2880
6	169.7531	-215.943	-2600	6	168.2685	-215.321	-2670	6	163.8474	-213.481	-2740	6	156.5932	-210.507	-2810	6	146.6956	-206.529	-2880
7	163.5405	-223.569	-2600	7	162.0842	-222.976	-2670	7	157.7509	-221.224	-2740	7	150.6454	-218.396	-2810	7	140.9631	-214.621	-2880
8	156.9856	-230.903	-2600	8	155.5563	-230.341	-2670	8	151.3091	-228.682	-2740	8	144.3501	-226.011	-2810	8	134.8814	-222.455	-2880
9	150.1022	-237.93	-2600	9	148.6991	-237.401	-2670	9	144.5318	-235.844	-2740	9	137.7161	-233.338	-2810	9	128.4601	-230.013	-2880
10	144.3218	-246.383	-2600	10	142.976	-245.834	-2670	10	138.9954	-244.234	-2740	10	132.4886	-241.654	-2810	10	123.657	-238.21	-2880
11	142.2545	-256.414	-2600	11	140.9905	-255.829	-2670	11	137.1631	-254.118	-2740	11	130.9018	-251.347	-2810	11	122.396	-247.628	-2880
12	144.221	-266.464	-2600	12	142.9932	-265.827	-2670	12	139.2556	-263.956	-2740	12	133.1342	-260.918	-2810	12	124.8001	-256.825	-2880
13	149.9162	-274.976	-2600	13	148.6645	-274.294	-2670	13	144.9339	-272.252	-2740	13	138.8167	-268.933	-2810	13	130.4664	-264.457	-2880
14	158.4566	-280.628	-2600	14	157.17	-279.909	-2670	14	153.3631	-277.732	-2740	14	147.1148	-274.193	-2810	14	138.5714	-269.423	-2880
15	168.5189	-282.543	-2600	15	167.1894	-281.787	-2670	15	163.2532	-279.548	-2740	15	156.7905	-275.908	-2810	15	147.9449	-271.009	-2880
16	178.6077	-282.063	-2600	16	177.2793	-281.299	-2670	16	173.3452	-279.034	-2740	16	166.885	-275.354	-2810	16	158.0541	-270.399	-2880
17	188.6328	-280.83	-2600	17	187.3048	-280.057	-2670	17	183.3708	-277.763	-2740	17	176.9134	-274.036	-2810	17	168.0905	-269.015	-2880
18	198.5374	-278.851	-2600	18	197.209	-278.067	-2670	18	193.2722	-275.741	-2740	18	186.8126	-271.959	-2810	18	177.9907	-266.864	-2880
19	208.2663	-276.137	-2600	19	206.9363	-275.341	-2670	19	202.9933	-272.979	-2740	19	196.5256	-269.137	-2810	19	187.6966	-263.959	-2880
20	217.7652	-272.703	-2600	20	216.4322	-271.895	-2670	20	212.479	-269.494	-2740	20	205.9965	-265.587	-2810	20	197.1505	-260.318	-2880
21	226.9804	-268.569	-2600	21	225.643	-267.746	-2670	21	221.6752	-265.304	-2740	21	215.1703	-261.327	-2810	21	206.2969	-255.961	-2880
22	235.8609	-263.757	-2600	22	234.5175	-262.92	-2670	22	230.5301	-260.434	-2740	22	223.9948	-256.384	-2810	22	215.0818	-250.915	-2880
23	244.3568	-258.295	-2600	23	243.0056	-257.443	-2670	23	238.9933	-254.912	-2740	23	232.4183	-250.785	-2810	23	223.4535	-245.209	-2880
24	252.4203	-252.213	-2600	24	251.0594	-251.345	-2670	24	247.0166	-248.768	-2740	24	240.3925	-244.563	-2810	24	231.3619	-238.877	-2880
25	260.0069	-245.545	-2600	25	258.6342	-244.662	-2670	25	254.555	-242.038	-2740	25	247.8717	-237.754	-2810	25	238.7611	-231.956	-2880
26	267.0735	-238.328	-2600	26	265.687	-237.43	-2670	26	261.5651	-234.759	-2740	26	254.8122	-230.396	-2810	26	245.6069	-224.488	-2880
27	273.5806	-230.604	-2600	27	272.1783	-229.69	-2670	27	268.0073	-226.973	-2740	27	261.174	-222.533	-2810	27	251.8587	-216.516	-2880
28	279.4927	-222.414	-2600	28	278.0719	-221.485	-2670	28	273.8453	-218.724	-2740	28	266.9207	-214.209	-2810	28	257.4799	-208.086	-2880
29	284.7751	-213.805	-2600	29	283.3339	-212.862	-2670	29	279.0451	-210.059	-2740	29	272.018	-205.473	-2810	29	262.4362	-199.25	-2880
30	289.3992	-204.826	-2600	30	287.9355	-203.869	-2670	30	283.5782	-201.027	-2740	30	276.4377	-196.375	-2810	30	266.6997	-190.06	-2880
31	293.3399	-195.525	-2600	31	291.851	-194.556	-2670	31	287.4193	-191.68	-2740	31	280.1552	-186.968	-2810	31	270.2464	-180.57	-2880
32	296.5732	-185.957	-2600	32	295.058	-184.977	-2670	32	290.5463	-182.07	-2740	32	283.1489	-177.306	-2810	32	273.0557	-170.836	-2880
33	299.0828	-176.173	-2600	33	297.5389	-175.184	-2670	33	292.9419	-172.252	-2740	33	285.4024	-167.446	-2810	33	275.1118	-160.915	-2880
34	300.854	-166.229	-2600	34	299.2798	-165.233	-2670	34	294.5924	-162.282	-2740	34	286.9017	-157.443	-2810	34	276.4013	-150.867	-2880
35	301.8758	-156.18	-2600	35	300.2698	-155.18	-2670	35	295.4872	-152.216	-2740	35	287.6373	-147.355	-2810	35	276.9156	-140.749	-2880
36	302.1443	-146.084	-2600	36	300.5047	-145.081	-2670	36	295.6224	-142.111	-2740	36	287.606	-137.241	-2810	36	276.6528	-130.621	-2880
37	301.6569	-135.995	-2600	37	299.9823	-134.992	-2670	37	294.9964	-132.025	-2740	37	286.8071	-127.158	-2810	37	275.6137	-120.543	-2880
38	300.4161	-125.971	-2600	38	298.7058	-124.971	-2670	38	293.6133	-122.014	-2740	38	285.2459	-117.165	-2810	38	273.8052	-110.575	-2880

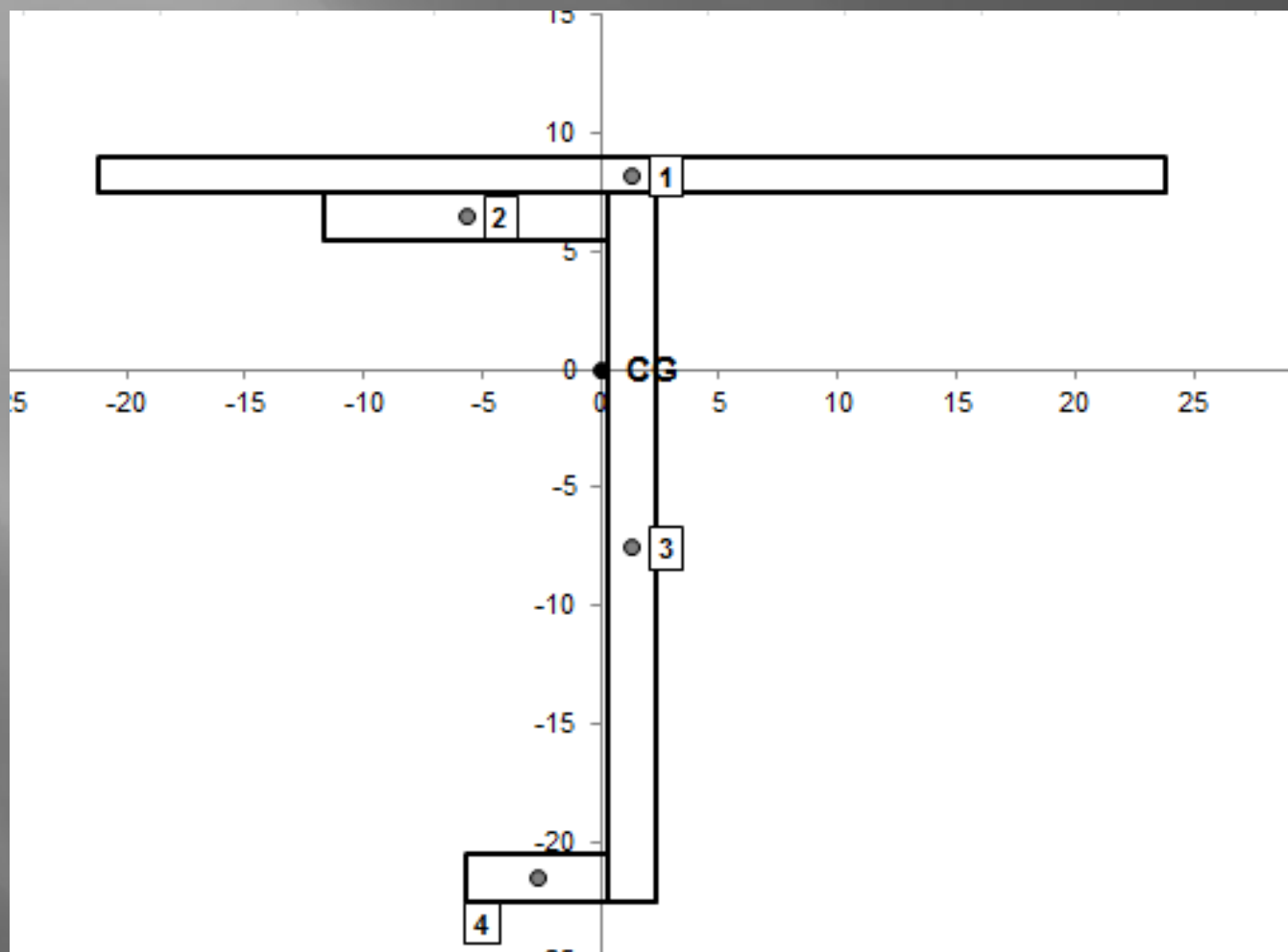
В программе Microsoft Excel методом конечных элементов определяются деформации воздуховода в зависимости от геометрических характеристик сечений, а также расчет по запасу прочности. Метод конечных элементов реализован встроенной процедурой VBA, разработанной в компании «Прогрестех-Дубна». Программный блок позволяет оценивать прочность и жесткость подкрепляющего набора воздуховода.

Перемещения конструкции определяются решением балочной конечно-элементной задачи в плоской постановке. Напряжения определяются по гипотезе плоских сечений исходя из нагрузок и геометрических характеристик сечений. Прочность рассчитывается по характеристикам материала, геометрии сечения и статической устойчивости элементов конструкции.

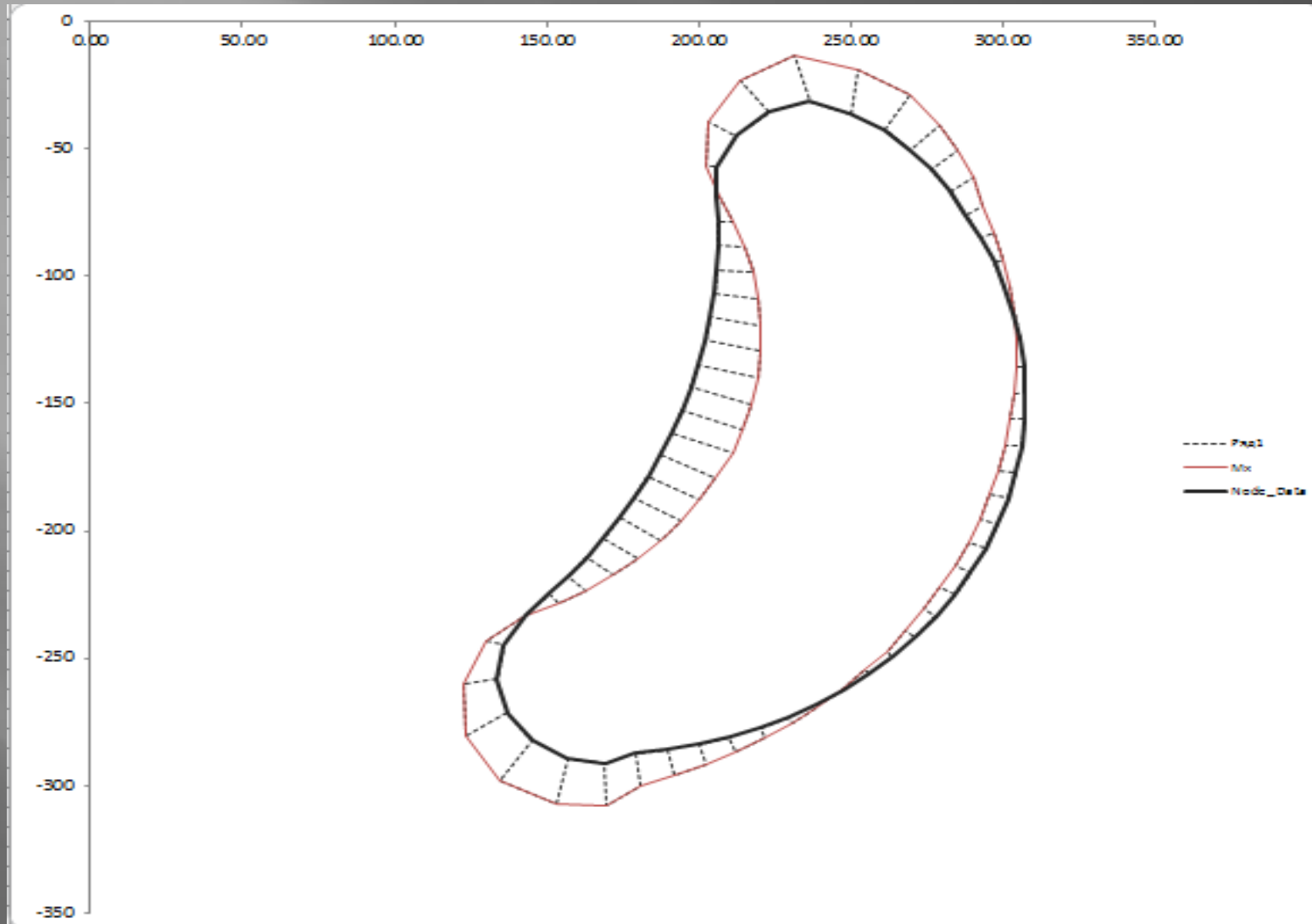
Представлена форма ввода данных и получения результатов КЭ расчета.
 Исходные данные: узловые координаты, граничные условия, узловые нагрузки, нумерация и жесткостные характеристики конечных элементов (обозначенные зеленым цветом). Результатом КЭ расчета являются: узловые перемещения, нагрузки конечных элементов (выделены коричневым - белым цветом).

Node_Data			Boundary conditions			Loading			Element_Data				Node_displacements			Element Forces						
Node_name	x_loc	y_loc	Fix_x	Fix_y	Fix_xy	Px	Py	Mz	Name	Node1	Node2	E*Ix	E*Area	x	y	xy	1	2	3	4	5	6
1	187.41	-170.2	1	1	1	-33.7579	17.2361		1	2	167389825	743850	0	0	0	-77.35	-30.81	-19882	77.347	30.806	19025	
2	183.27	-178.7				-38.5125	19.3377		2	2	167389825	743850	0.004	-0.003	0.001	-72.16	-137.6	-19025	72.163	137.61	17726	
3	178.75	-186.9				-37.5603	21.6784		3	3	167389825	743850	0.017	-0.011	0.002	-64.84	-184.1	-17726	64.843	184.12	15983	
4	173.85	-195				-36.5295	23.3737		4	4	167389825	743850	0.038	-0.025	0.003	-55.4	-230.2	-15983	55.404	230.25	13816	
5	168.59	-202.8				-35.4222	25.0200		5	5	167389825	743850	0.065	-0.044	0.004	-43.86	-275.9	-13816	43.865	275.9	11212	
6	162.38	-210.4				-34.2407	26.6140		6	6	167389825	743850	0.097	-0.068	0.005	-30.25	-321	-11212	30.249	320.97	8183.1	
7	157.03	-217.7				-32.3876	28.1523		7	7	167389825	743850	0.133	-0.098	0.005	-14.59	-365.4	-8183	14.587	365.38	4735	
8	150.75	-224.8				-31.6651	29.6313		8	8	167389825	743850	0.171	-0.132	0.006	-1.335	-409	-4735	1.3354	409.03	88.174	
9	142.89	-233				-34.1341	27.3236		9	9	167389825	743850	0.217	-0.176	0.006	-33.85	-443.2	-88.17	33.852	443.17	-5952	
10	135.77	-244.6				-40.7576	17.3044		10	10	167389825	743850	0.282	-0.218	0.005	-268.6	-415.5	5952.4	268.58	415.48	-11616	
11	133.68	-258.1				-44.2784	0.2223		11	11	167389825	743850	0.350	-0.233	0.005	-419.1	-322.4	11616	419.06	322.45	-16011	
12	136.36	-271.3				-40.9294	-16.8941		12	12	167389825	743850	0.408	-0.227	0.004	-521.9	-178.5	16011	521.94	178.53	-18444	
13	145.1	-282.3				-31.2301	-31.3895		13	13	167389825	743850	0.446	-0.211	0.002	-561.3	-6.04	18444	561.26	6.0401	-18526	
14	156.82	-289.2				-16.6857	-41.0193		14	14	167389825	743850	0.465	-0.199	0.001	-535.7	152.22	18526	535.74	-152.2	-16656	
15	168.93	-291.3				-3.1642	-44.4332		15	15	167389825	743850	0.474	-0.200	-0.001	-400.6	365.49	16656	400.56	-365.5	-12613	
16	179.25	-287.3				3.7767	-44.3512		16	16	167389825	743850	0.483	-0.208	-0.002	-479.5	211.9	12613	479.54	-211.9	-10389	
17	189.66	-286				7.0822	-43.3451		17	17	167389825	743850	0.493	-0.228	-0.002	-464.1	202.72	10389	464.06	-202.7	-8262	
18	199.34	-283.9				10.3493	-43.2918		18	18	167389825	743850	0.504	-0.253	-0.003	-449.3	192.36	8262.4	449.34	-192.4	-6244	
19	210.04	-281.1				13.5550	-42.3973		19	19	167389825	743850	0.519	-0.282	-0.003	-435.4	180.91	6244.4	435.44	-180.9	-4346	
20	219.91	-277.5				16.6878	-41.2645		20	20	167389825	743850	0.537	-0.314	-0.004	-422.4	168.53	4346.2	422.4	-168.5	-2578	
21	229.47	-273.2				19.7268	-39.9010		21	21	167389825	743850	0.559	-0.348	-0.004	-410.4	155.13	2578.2	410.36	-155.1	-950.7	
22	238.69	-268.2				22.6529	-38.3150		22	22	167389825	743850	0.584	-0.381	-0.004	-399.3	140.89	950.7	399.34	-140.9	527.52	
23	247.51	-262.5				25.4556	-36.5134		23	23	167389825	743850	0.611	-0.413	-0.004	-389.4	125.91	527.5	389.41	-125.9	1848.4	
24	255.87	-256.1				28.1142	-34.5085		24	24	167389825	743850	0.640	-0.443	-0.004	-380.6	110.16	1848.4	380.64	-110.2	3004.2	
25	263.75	-249.2				30.6143	-32.3105		25	25	167389825	743850	0.671	-0.469	-0.004	-373.1	93.846	3004.2	373.06	-93.85	3388.7	
26	271.08	-241.7				32.9456	-29.9300		26	26	167389825	743850	0.702	-0.492	-0.004	-366.7	77.008	3388.7	366.73	-77.01	4796.6	
27	277.82	-233.7				35.0306	-27.3842		27	27	167389825	743850	0.733	-0.511	-0.003	-361.7	59.704	4796.6	361.68	-59.7	5423.1	
28	283.95	-225.2				37.0399	-24.6838		28	28	167389825	743850	0.762	-0.526	-0.003	-357.9	42.134	5423.1	357.92	-42.13	5865.1	
29	289.43	-216.2				38.7830	-21.8440		29	29	167389825	743850	0.789	-0.537	-0.003	-355.5	24.292	5865.5	355.5	-24.29	6120	
30	294.22	-206.9				40.3074	-18.8854		30	30	167389825	743850	0.814	-0.544	-0.002	-354.4	6.2991	6120.3	354.42	-6.299	6186.1	
31	298.3	-197.2				41.6064	-15.8185		31	31	167389825	743850	0.835	-0.548	-0.002	-354.7	-11.67	6186.3	354.68	11.667	6063.6	
32	301.64	-187.3				42.6728	-12.6631		32	32	167389825	743850	0.853	-0.548	-0.001	-356.3	-29.62	6064.3	356.29	29.622	5752.9	
33	304.23	-177.1				43.4398	-9.4393		33	33	167389825	743850	0.867	-0.547	-0.001	-359.2	-47.38	5753.3	359.23	47.384	5255.7	
34	306.06	-166.8				44.0834	-6.1586		34	34	167389825	743850	0.877	-0.543	-0.001	-363.5	-64.84	5256.3	363.5	64.836	4575.5	
35	307.11	-156.3				44.4203	-2.8451		35	35	167389825	743850	0.883	-0.539	0.000	-369.1	-81.99	4575.9	369.03	81.987	3715.3	
36	307.37	-145.8				44.5085	0.4827		36	36	167389825	743850	0.886	-0.534	0.000	-375.9	-98.63	3715.8	375.88	98.631	2880.5	
37	306.85	-135.4				44.3472	3.8106		37	37	167389825	743850	0.887	-0.528	0.000	-383.9	-114.7	2880.9	383.93	114.71	1477.1	
38	305.55	-124.3				43.9387	7.1144		38	38	167389825	743850	0.885	-0.523	0.000	-393.1	-130.2	1477.3	393.15	130.2	110.97	
39	303.47	-114.7				43.2842	10.3793		39	39	167389825	743850	0.881	-0.518	0.000	-403.5	-144.9	110.97	403.52	144.89	-1409	
40	300.63	-104.6				42.3861	13.5879		40	40	167389825	743850	0.878	-0.513	0.000	-414.9	-158.8	1409.9	414.95	158.8	-3075	
41	297.04	-94.7				41.2523	16.7170		41	41	167389825	743850	0.874	-0.508	0.000	-427.4	-171.8	3075.1	427.38	171.84	-4878	
42	292.73	-85.14				39.8868	19.7551		42	42	167389825	743850	0.873	-0.502	0.000	-440.8	-183.8	4878.4	440.77	183.84	-6807	
43	287.71	-75.92				38.2979	22.6830		43	43	167389825	743850	0.873	-0.495	-0.001	-438.3	-230	6806.6	438.31	229.96	-9241	
44	282.68	-66.61				36.4962	25.4814		44	44	167389825	743850	0.878	-0.488	-0.001	-470.1	-204.7	9240.8	470.06	204.7	-11401	
45	276.3	-58.2				34.4882	28.1400		45	45	167389825	743850	0.885	-0.471	-0.002	-485.6	-213.4	11401.1	485.8	213.42	-13654	
46	269.32	-50.29				32.2892	30.6417		46	46	167389825	743850	0.897	-0.451	-0.003	-504.9	-214.6	13654.3	504.91	214.57	-16124	
47	260.97	-42.36				27.1737	35.2905		47	47	167389825	743850	0.916	-0.421	-0.004	-549.8	-122.6	16124.5	549.81	122.57	-17669	
48	249.91	-36.29				14.7284	41.7238		48	48	167389825	743850	0.933	-0.370	-0.005	-561.7	-81.18	17669.3	561.82	81.185	-18832	
49	236.46	-31.41				-2.5893	44.2106		49	49	167389825	743850	0.950	-0.291	-0.006	-505.4	235.74	18832.3	505.41	-235.7	-15532	
50	223.12	-35.67				-19.3326	39.8583		50	50	167389825	743850	0.911	-0.199	-0.008	-387.5	368.49	15532.3	387.49	-368.5	-10352	
51	212.39	-44.75				-33.1543	29.3190		51	51	167389825	743850	0.829	-0.114	-0.009	-225.1	447.22	10352.9	225.09	-447.2	1051	
52	206.02	-57.29				-41.9419	14.1234		52	52	167389825	743850	0.711	-0.059	-0.010	-23.44	458.29	4058.7	23.444	-458.3	1453.9	
53	205.73	-69.09				-44.0698	1.7585		53	53	167389825	743850	0.598	-0.057	-0.010	6.4557	414.84	1352.3	6.456	-414.8	5266.9	
54	206.2	-78.52				-43.3554	-1.1113		54	54	167389825	743850	0.508	-0.061	-0.009	-11.6	371.34	5267.3	11.596	-371.3	8771.3	

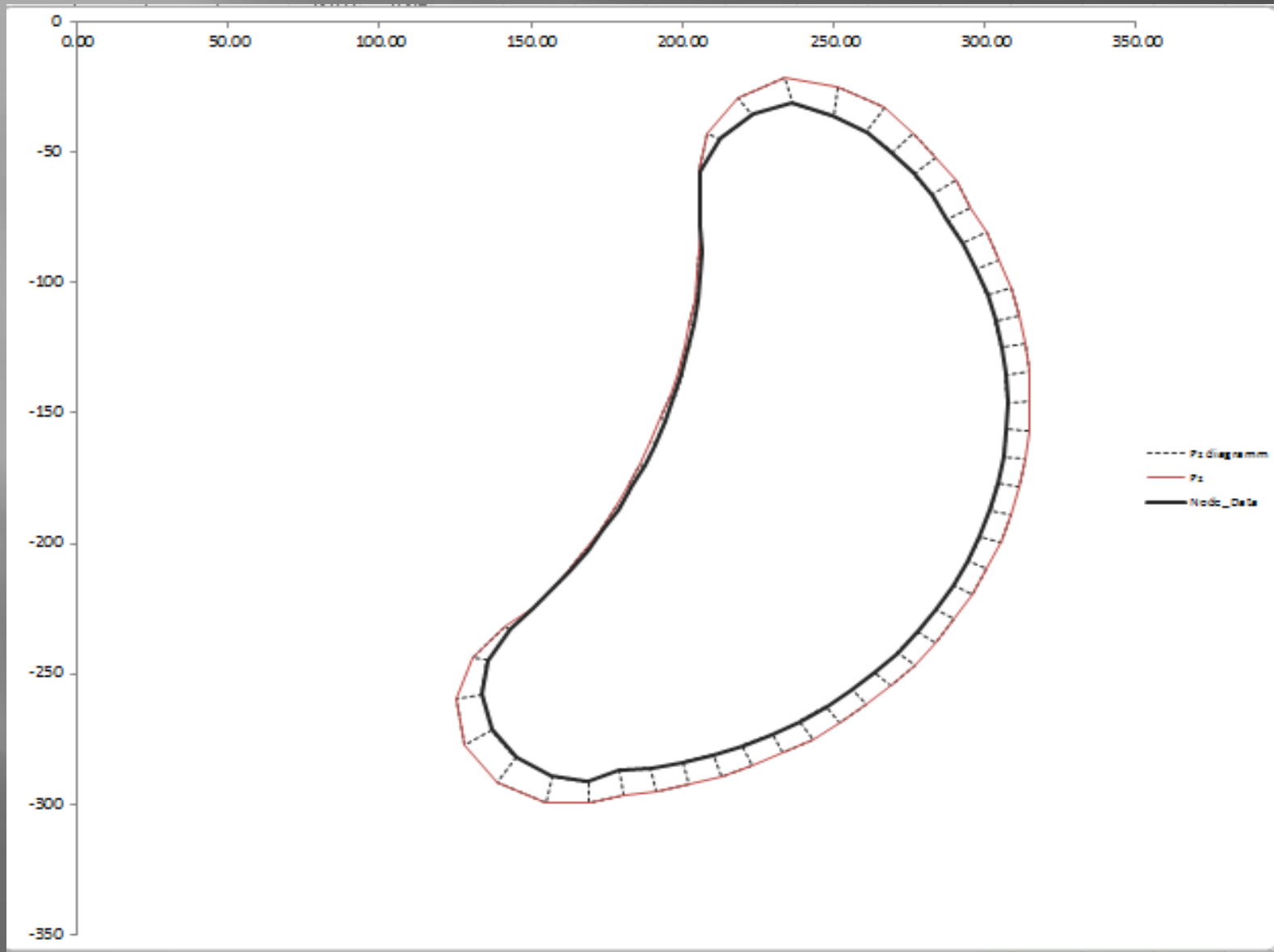
Поперечное сечение подкрепляющего элемента воздуховода состоит из 4 элементов (1-обшивка, 2-внешняя полка, 3-стенка, 4- внутренняя полка)



Эпюра моментов

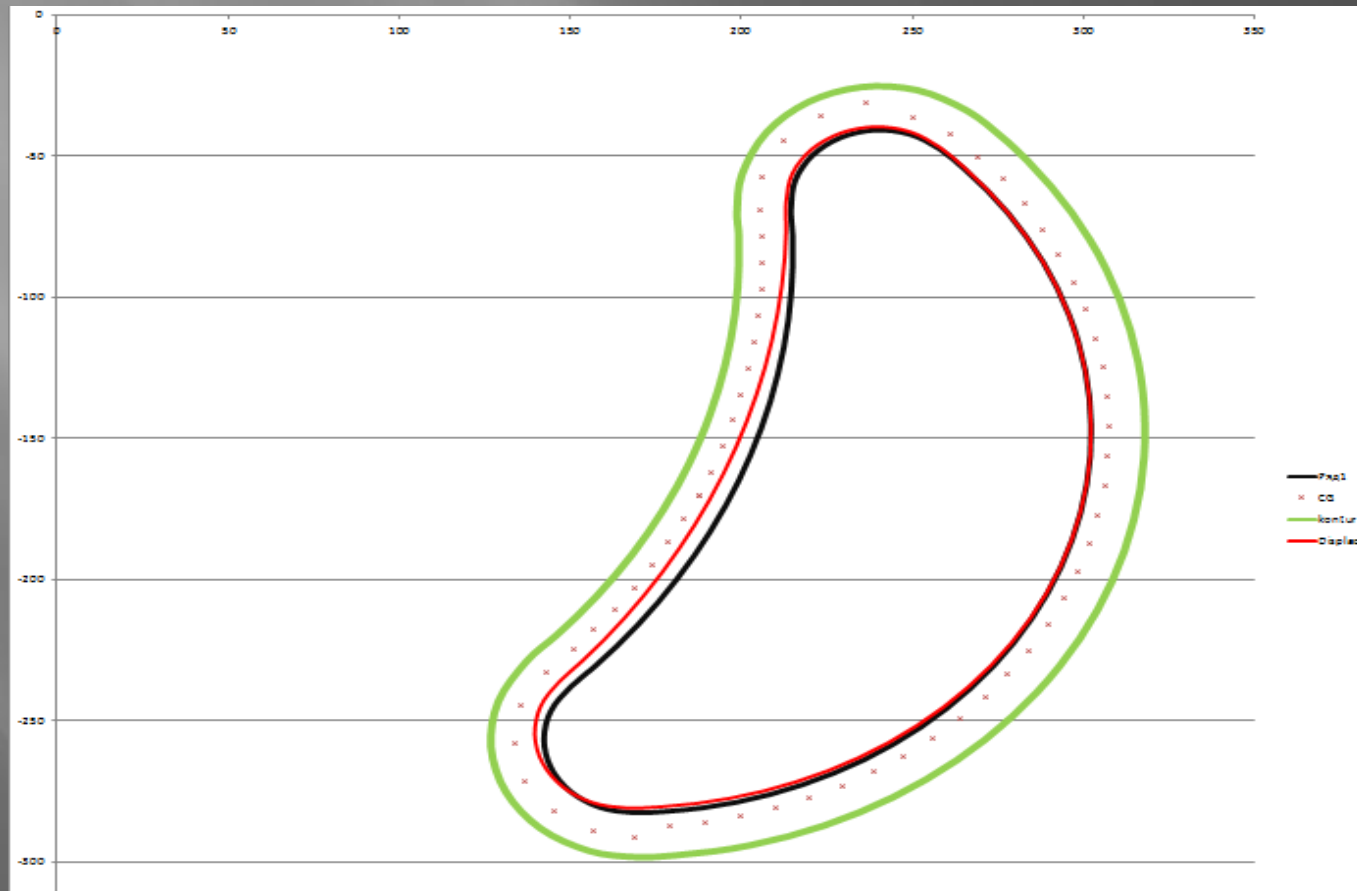


Эпюра поперечных сил



КЭ расчет производится с учетом расположения центров тяжести сечений подкрепляющего набора. Методом конечных элементов рассчитываются нагрузки сечений и перемещения.

Далее на основе нагрузок производится расчет прочности сечений с учетом локальной устойчивости отдельных элементов сечений. Напряжения определяются по гипотезе плоских сечений исходя из нагрузок и геометрических характеристик сечений.



Вариацией геометрических характеристик сечений (t_1 , t_2 , w_1 , h , w_2) подбираются наиболее оптимальные, удовлетворяющие требованиям жесткости и прочности: минимальный коэффициент запаса прочности (\min_RF) превышал 1, приведенная толщина обшивки воздуховода (t_eq) не превышала 4 мм, максимальная деформация (\max_d) не превышала 2.5 мм, отношение изменения площади поперечного сечения воздуховода в деформированном состоянии к длине контура поперечного сечения (Dt) не превышало 1 мм.

Total Section	63		x_loc	y_loc		Ycg =	-8.7327		t_eq	2.89	<4
t1 =	1.5	mm	199.1652	-164.983		Ix =	#####		min_RF	1.20	>1
t2 =	2	mm	Mx =	21333.87	kgs*mm	A =	151.5000		max_d	1.03	<2.5
w1 =	8	mm	Pz =	79.35094	kgs	RF =	1.20		Dt	0.44	<1
h =	30	mm									
w2 =	8	mm									
h	h_min	h_max	w2	w2_min	w2_max	Ycg	Ix	A	RF		
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.28	15.75	-0.89834
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.34	15.75	-0.8773
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.44	15.75	-0.85443
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.60	15.75	-0.82978
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.85	15.75	-0.80338
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	2.29	15.75	-0.7753
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	3.15	15.75	-0.74561
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	5.50	15.75	-0.71434
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	42.80	15.75	-0.82548
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	5.84	15.75	-0.97941
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	2.81	15.75	-0.98139
30	16	30	8	8	16	-8.73267	18508.58	151.5	1.99	15.75	-0.83111

Рассчитывались напряжения(s_1, s_2) и коэффициенты запаса прочности. В качестве предельно-допустимого напряжения принималось значение sd -в зеленой ячейке

		$y_1 =$	9.482673	
		$y_2 =$	-22.0173	
		$s_1 = -Mx \cdot y_1 / I_x + Px / A =$	-10.4	kgs/mm ²
		$s_2 = -Mx \cdot y_2 / I_x + Px / A =$	25.9	kgs/mm ²
		$sd =$	31	kgs/mm ²
		$RF =$	2.98	
			1.20	

В процессе преддипломной практики была разработана программная процедура расчета подкрепляющего набора воздуховода, а также программный блок, который позволяет оценивать прочность и жесткость поперечного звена воздуховода. Найдены перемещения конструкции, определяющиеся решением балочной конечно-элементной задачи в плоской постановке.

**Спасибо за
внимание**