



Российские САЕ-системы на службе промышленности²⁰²⁰

Верификация расчетного ядра программных продуктов АРМ в Ростехнадзоре

Александр Замрий



НТЦ «АПМ» - ведущий разработчик ПО для инженерных расчетов



Аттестация модуля APM Structure3D 2013 года

Назначение ПС

ПС предназначено для выполнения расчётов напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций ОИАЭ методом конечных элементов.

Рассчитываемыми параметрами являются:

перемещения (линейные/угловые);
внутренние усилия (силы/моменты);
напряжения;
реактивные силы/моменты в закреплённых узлах;
частоты и формы собственных колебаний;
коэффициент запаса по статической устойчивости и форма потери устойчивости.

Федеральная служба
по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)
Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ ПО АТТЕСТАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ
ПРИ РОСТЕХНАДЗОРЕ

**АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ
ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА**

Регистрационный номер 330 от 18 апреля 2013 года

Настоящий аттестационный паспорт устанавливает назначение и область применения программного средства

APM Structure3D (версия 10.2),
которые указаны в разделе 2 приложения к настоящему аттестационному паспорту.

Аттестационный паспорт выдан
Обществу с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «АПМ»
(ООО НТЦ «АПМ»)
Юридический адрес: 141070, г. Королев, Московская обл., Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6.

*Настоящий аттестационный паспорт действует при соблюдении условий
Приложения, являющегося его неотъемлемой частью.*

Срок действия аттестационного паспорта до 18 апреля 2023 года

Заместитель директора
ФБУ «НТЦ ЯРБ»,
председатель экспертного Совета
по аттестации программных средств
при Ростехнадзоре

С. Н. Богдан

ETSON EUROPEAN
TECHNICAL SAFETY
ORGANIZATION
NETWORK

PC ISO 9001:2008
Certified Management System



Объекты и виды расчетов, ДОБАВЛЕННЫЕ к аттестации расчетного ядра АРМ в 2019 году

- **Односторонние жесткие и упругие опоры** (с разной жесткостью в разных направлениях), в том числе и с зазорами;
- **Трубопроводные КЭ** (прямолинейные участки, отводы, тройники и т.п.), нагрузки (заполнение средой, внутреннее/наружное давление, температура);
- Расчет оборудования и трубопроводов на **сейсмическое воздействие**, в том числе задаваемое спектром ответа.
- Решение **контактной задачи** (классической задачи Герца контакта двух тел, контакт типа плоскость – плоскость, соединении вал – втулка с натягом и т.п.)



Примеры верификационных задач

Статический расчет. Криволинейный брус под действием силы в плоскости (задача Головина)

Исходные данные

$E = 2.0 \cdot 10^5$ МПа - модуль упругости,

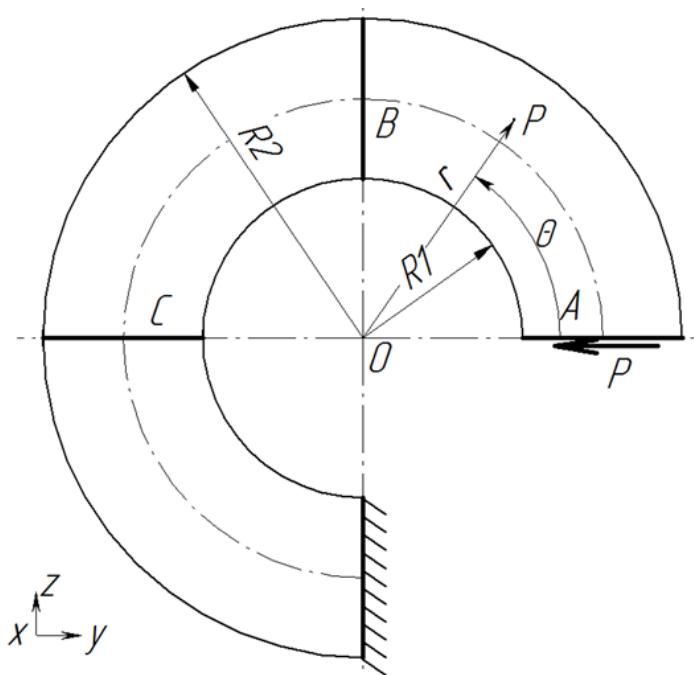
$\mu = 0.3$ - коэффициент Пуассона,

$R_2 = 300$ мм – внешний радиус кольца,

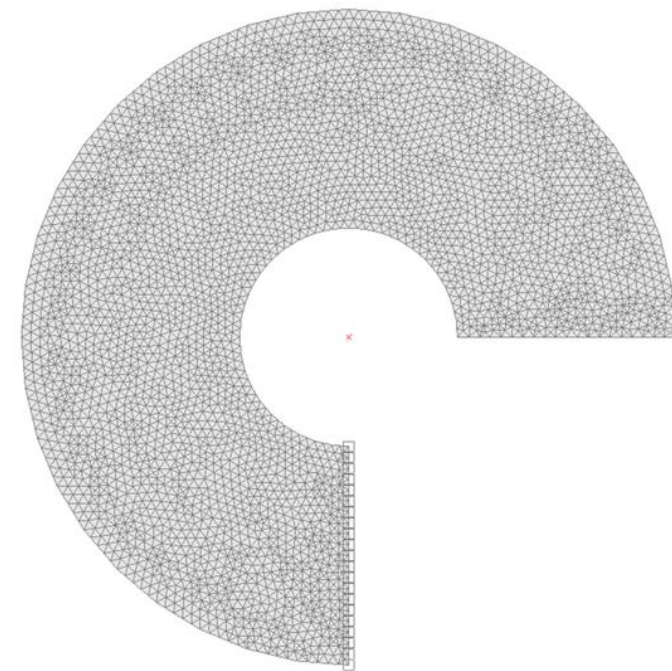
$R_1 = 100$ мм – внутренний радиус кольца.

$h = 1$ мм – толщина кольца,

$P = 2,1$ кН = 2100 Н – суммарная величина
распределенной силы;



Определить: значения напряжений в сечениях В и С.

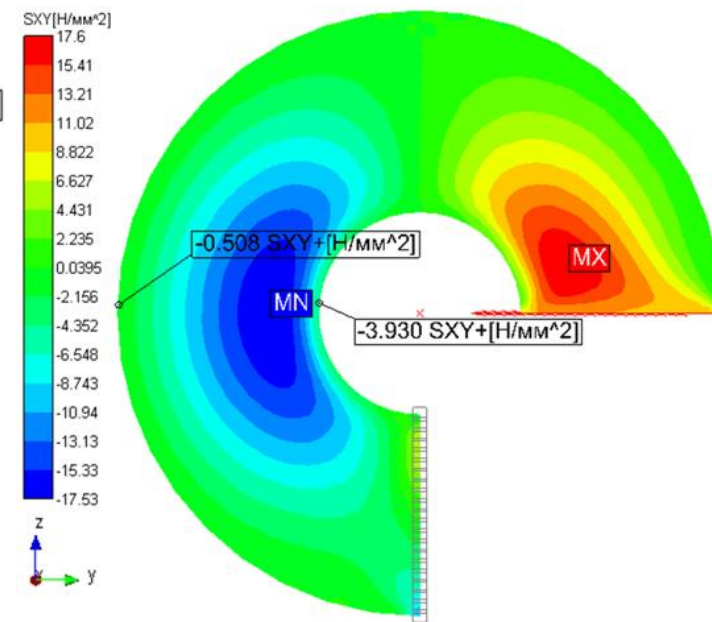
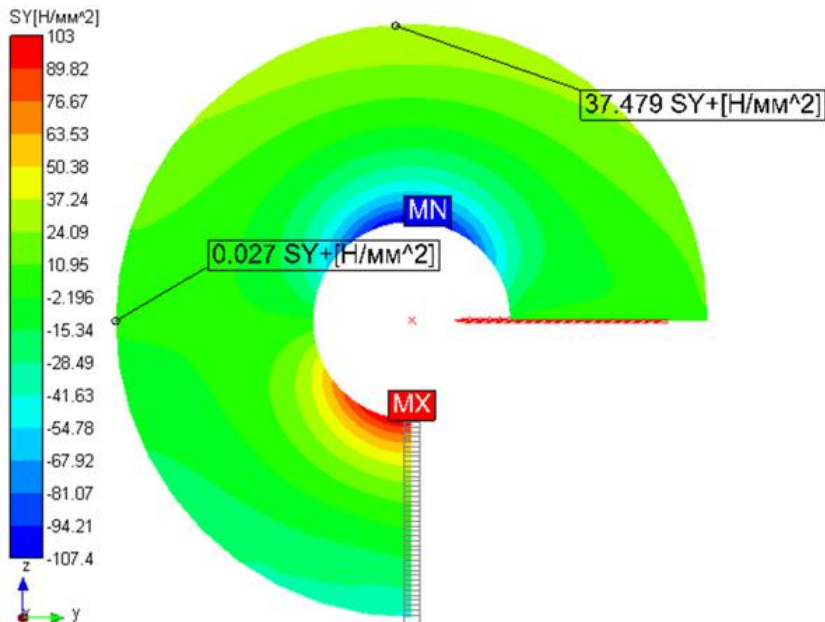
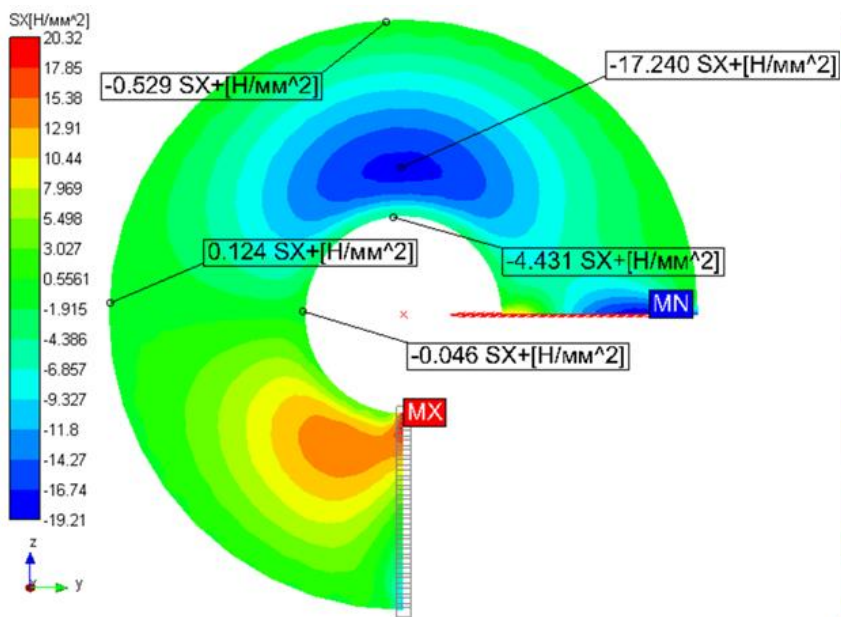


КЭ модель кольца из пластин. Оси ЛСК пластин ориентированы: X – по радиусу, Y – в окружном направлении



Примеры верификационных задач

Статический расчет. Криволинейный брус под действием силы в плоскости (задача Головина)



Карта распределения напряжений в радиальном направлении по оси X (слева) и окружном направлении по оси Y (справа) локальной системы координат пластин

Карта распределения касательных напряжений в плоскости кольца



Примеры верификационных задач

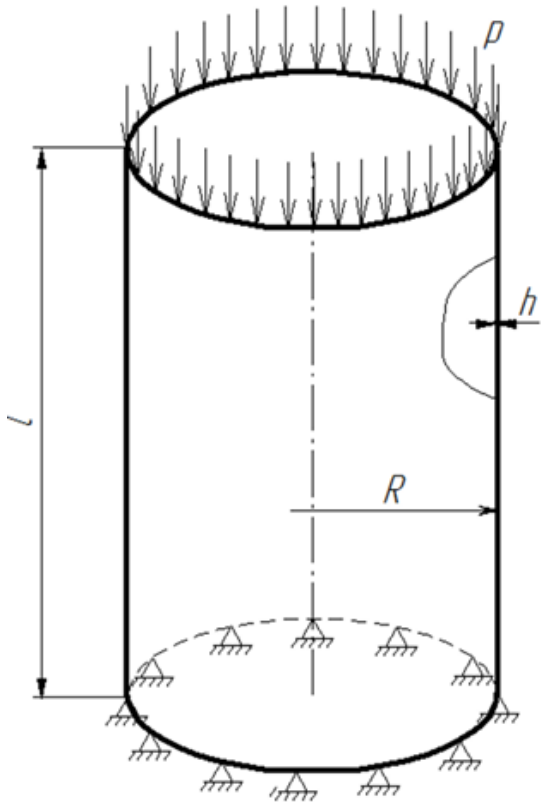
Статический расчет. Криволинейный брус под действием силы в плоскости (задача Головина)

Величина напряжений		В сечении В ($\theta = \pi/2$)			В сечении С ($\theta = \pi$)		
		Теоретическое значение	APM Structure3D	Погрешность, %	Теоретическое значение	APM Structure3D	Погрешность, %
На внутреннем радиусе R1, МПа	В радиальном направлении, σ_r	0	-4,71	-	0	-0,05	-
	В окружном направлении, σ_θ	-112,52	-107,4	4,5	0	0,12	-
Максимальное значение напряжений, МПа	В радиальном направлении, σ_r	-17,59	-17.24	1,9	В данном сечении максимум отсутствует		
На внешнем радиусе R2, МПа	В радиальном направлении, σ_r	0	-0,53	-	0	0,12	-
	В окружном направлении, σ_θ	37,5	37.5	0	0	0,03	-



Примеры верификационных задач

Расчет на устойчивость. Устойчивость цилиндрической оболочки, шарнирно опертой по торцам под равномерно распределённым осевым давлением



Исходные данные

$E = 2.0 \cdot 10^5$ МПа - модуль упругости,

$\mu = 0.3$ - коэффициент Пуассона,

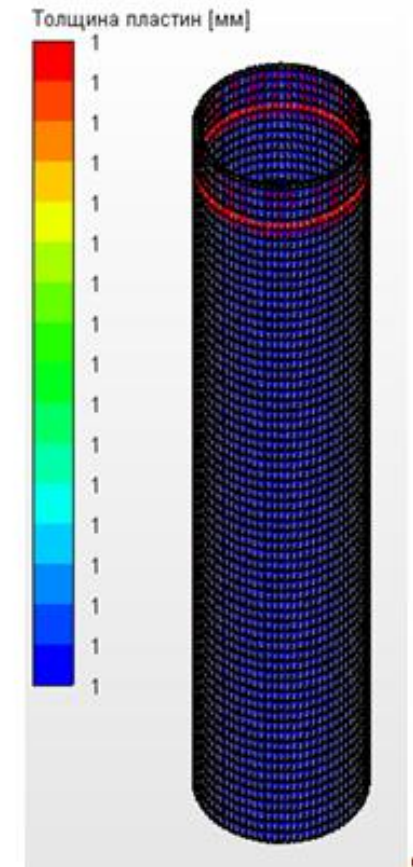
$l = 162,5$ мм - длина оболочки;

$R = 15$ мм – радиус оболочки;

$h = 1$ мм - толщина оболочки;

$p = 439,6$ Н/мм – величина распределенной нагрузки

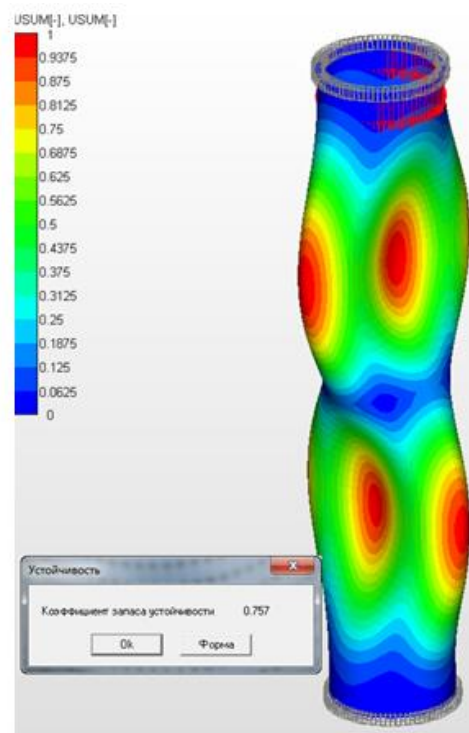
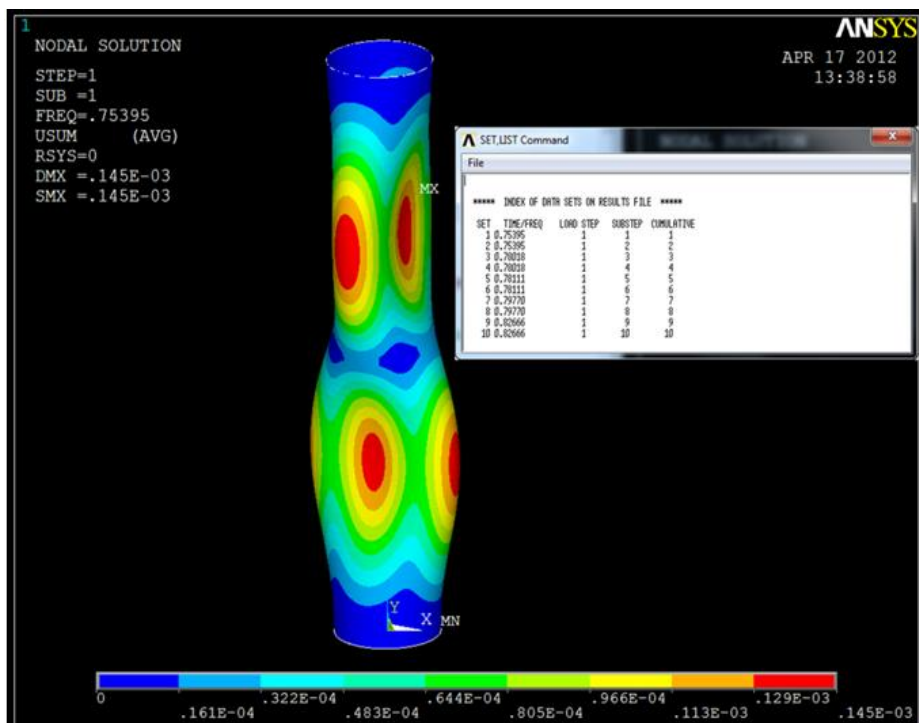
Определить коэффициент запаса по устойчивости и форму потери устойчивости.





Примеры верификационных задач

Расчет на устойчивость. Устойчивость цилиндрической оболочки, шарнирно опертой по торцам под равномерно распределённым осевым давлением



Параметр	Теоретическое значение	ANSYS	APM Structure 3D	Погрешность, %
Коэффициент запаса по устойчивости	1	0.754	0.757	3,9

Форма потери устойчивости цилиндрической оболочки и величина коэффициента запаса по устойчивости полученные в ANSYS (слева) и в APM Structure3D (справа)

Погрешность расчета устойчивости сжатой цилиндрической оболочки



Примеры верификационных задач

Расчет на собственные частоты. Собственные частоты трубопровода, закрепленного жесткими и упругими опорами

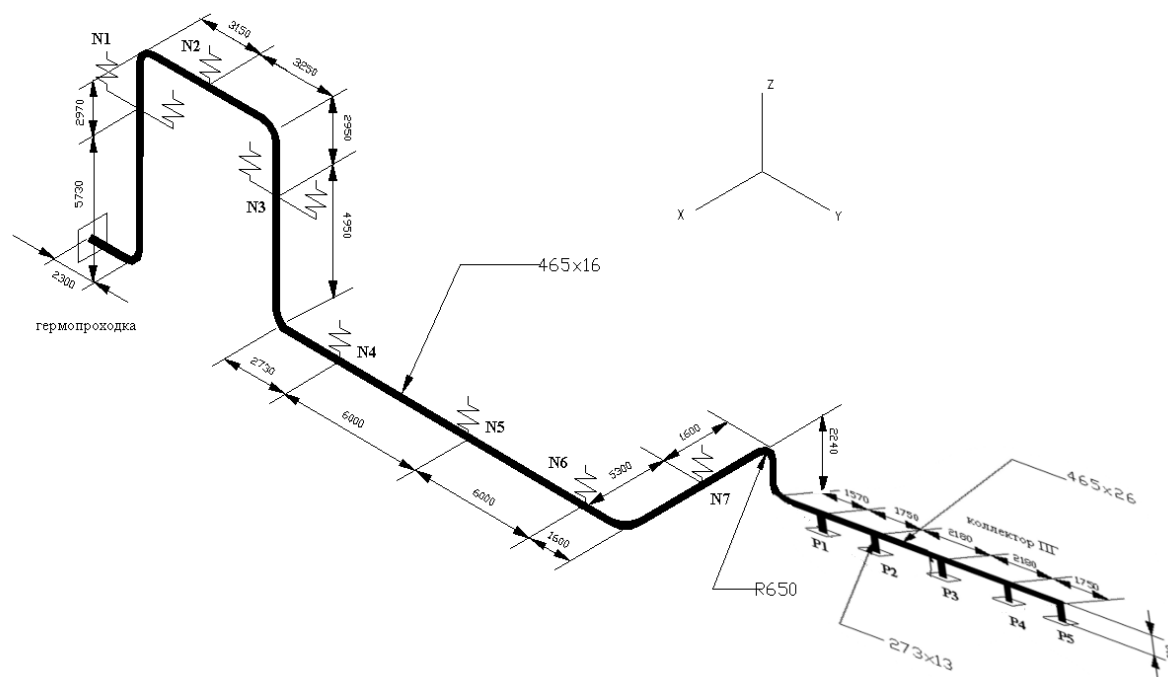
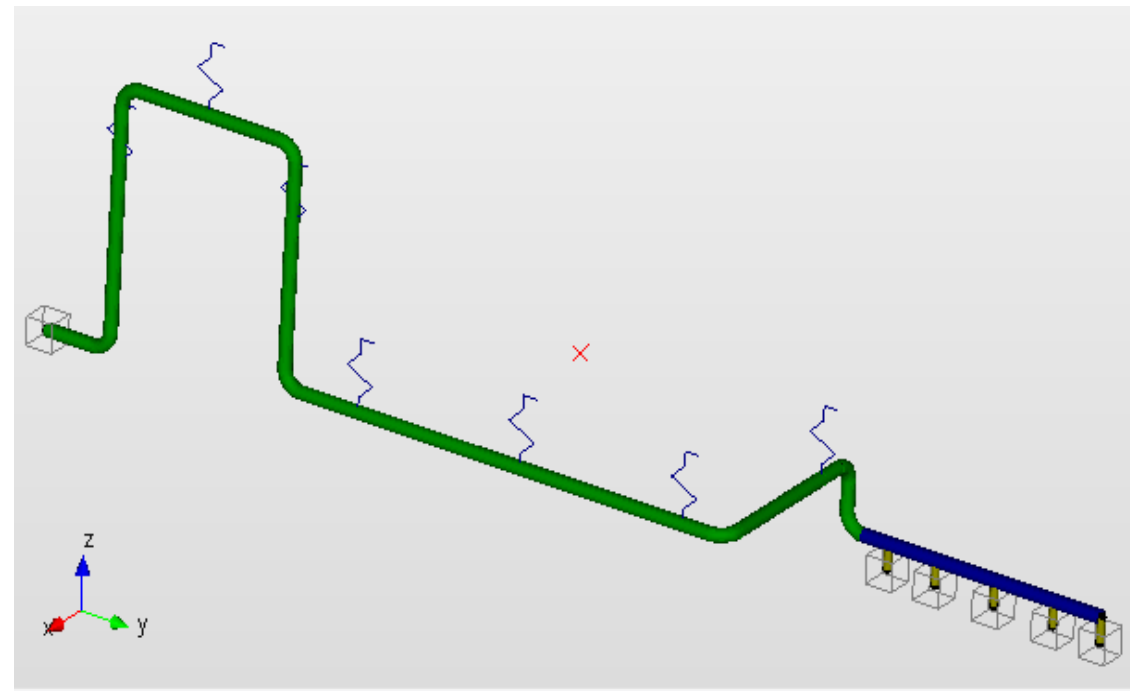


Схема изогнутого трубопровода на упругих и жестких опорах

Жесткость упругого закрепления по оси Z - $1 \cdot 10^8$ Н/м



Конечно элементная модель трубопровода с упругими и жесткими опорами в объемном представлении в модуле APM Structure3D

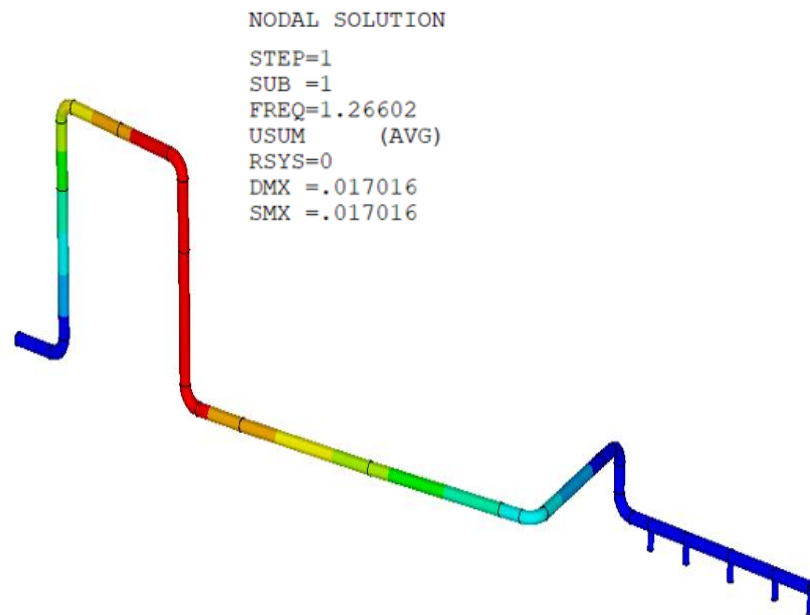
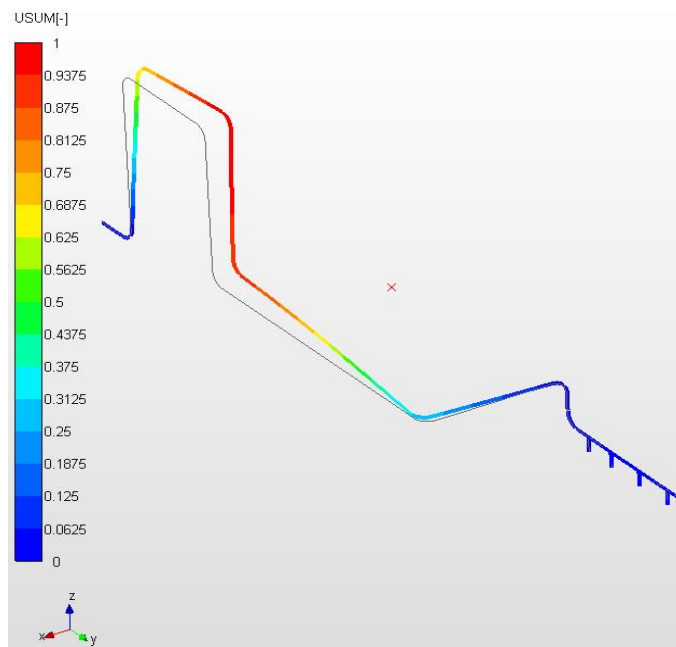


Примеры верификационных задач

Расчет на собственные частоты. Собственные частоты трубопровода, закрепленного жесткими и упругими опорами

N	[рад/с]	[Гц]	[с]
1	7.96292	1.26734	0.789055
2	11.2003	1.78258	0.560985
3	14.5381	2.31381	0.432187
4	24.3753	3.87945	0.257768
5	38.77	6.17044	0.162063
6	43.5127	6.92527	0.144399
7	66.268	10.5469	0.0948148
8	98.2204	15.6323	0.0639703
9	132.32	21.0594	0.0474847
10	144.011	22.9201	0.0436298
11	152.17	24.2187	0.0412905
12	182.999	29.1252	0.0343345
13	186.757	29.7233	0.0336437
14	207.939	33.0946	0.0302164
15	248.147	39.4938	0.0253204
16	263.192	41.8883	0.023873
17	271.84	43.2646	0.0231136
18	285.172	45.3865	0.022033
19	291.631	46.4146	0.021545
20	300.238	47.7844	0.0209273

1	1.2660
2	1.7811
3	2.3126
4	3.8800
5	6.1710
6	6.9264
7	10.551
8	15.651
9	21.086
10	22.955
11	24.272
12	29.180
13	29.787
14	33.203
15	39.558
16	41.946
17	43.420
18	45.421
19	46.440
20	48.006



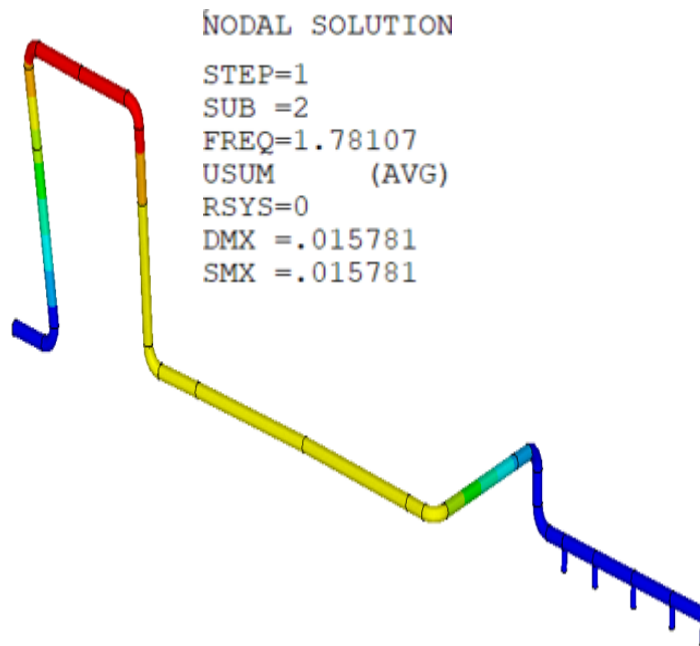
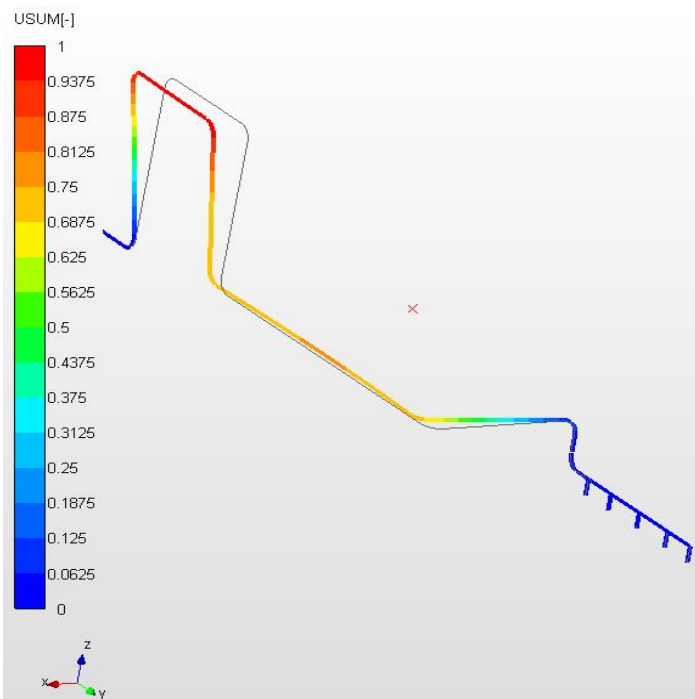
Собственные частоты модели трубопровода, полученные в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа)

Первая форма собственных колебаний трубопровода полученная в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа)



Примеры верификационных задач

Расчет на собственные частоты. Собственные частоты трубопровода, закрепленного жесткими и упругими опорами



№ собственной частоты	ANSYS, Гц	APM Structure3D, Гц	Погреш- ность, %
1	1,2660	1,267	0,07
2	1,7811	1,783	0,11
3	2,3126	2,314	0,06
4	3,8800	3,879	0,02
5	6,1710	6,170	0.02
6	6,9264	6.93	0.05
7	10,551	10,55	0.05
8	15,651	15,63	0.13
9	21,086	21,06	0.12
10	22,955	22,92	0,15

Вторая форма собственных колебаний трубопровода полученная в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа)

Сравнение значений частот собственных колебаний трубопровода, полученных в модуле APM Structure3D по сравнению с ANSYS



Примеры верификационных задач

Вынужденные колебания. Вынужденные колебания сборочной единицы при гармонической вибрации основания на заданной частоте с заданным ускорением

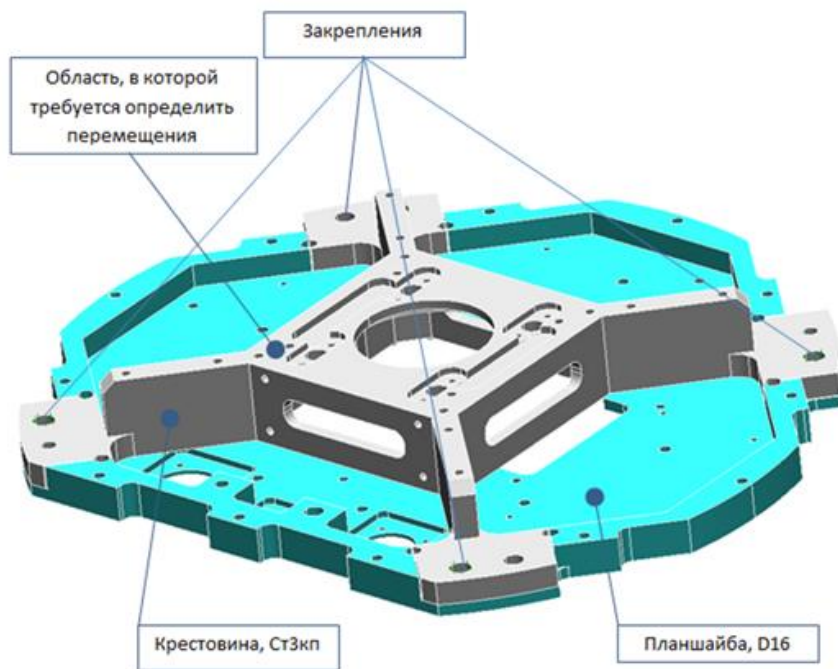
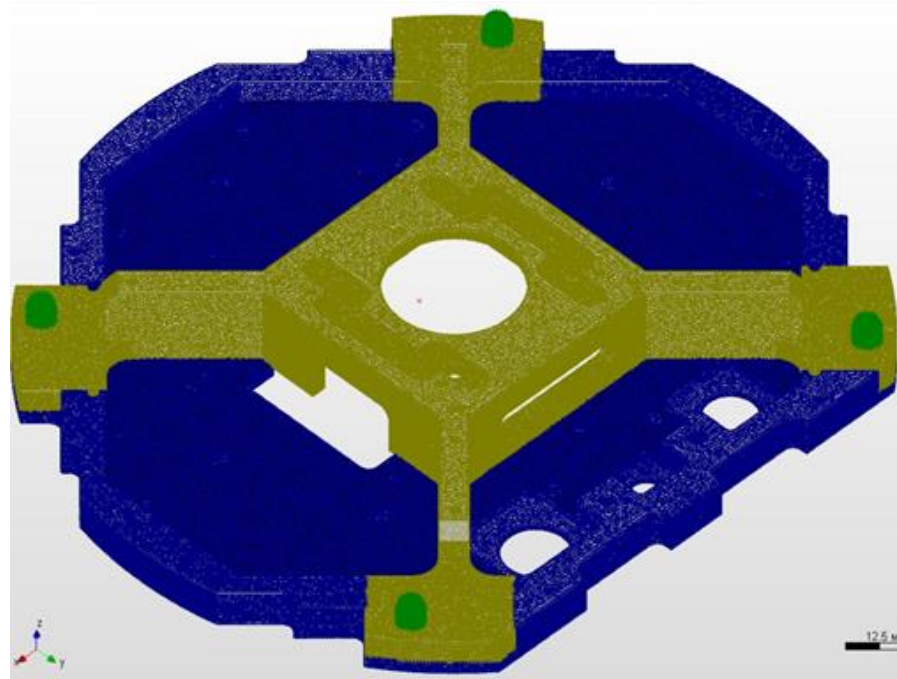


Схема сборочной единицы из соединенных жестко двух деталей

Исходные данные

$E_{D16} = 7 \cdot 10^4$ МПа - модуль упругости материала D16 - планшайбы,
 $E_{Ст3кп} = 2 \cdot 10^5$ МПа - модуль упругости материала Ст3кп - крестовины,
 $\mu_{D16} = 0.34$ - коэффициент Пуассона материала D16,
 $\mu_{Ст3кп} = 0.3$ - коэффициент Пуассона материала Ст3кп,
 $\rho_{D16} = 2700$ кг/м³ - плотность материала D16;
 $\rho_{Ст3кп} = 7800$ кг/м³ - плотность материала Ст3кп;
 $f = 500$ Гц - частота вибрации вибростенда;
 $a = 1 g = 9810$ мм/с² - ускорение, обеспечиваемое вибростендом;
 $D = 0,21$ - величина затухания (логарифмический декремент колебаний).



Конечно элементная модель сборочной единицы из 4-х узловых объемных элементов

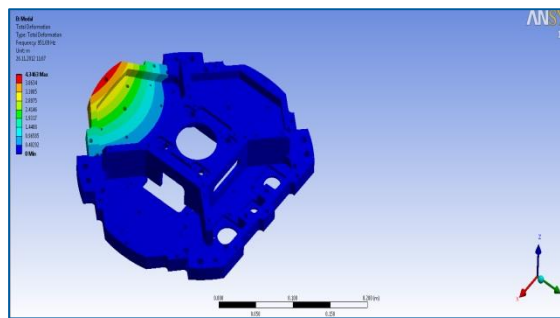
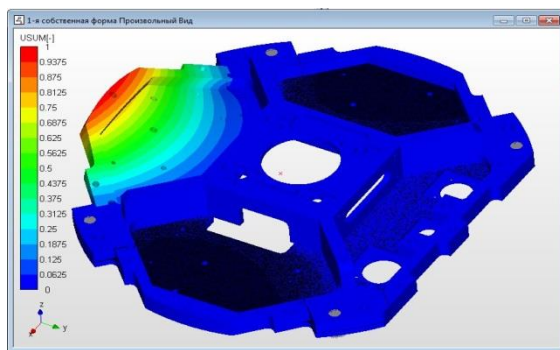


Примеры верификационных задач

Вынужденные колебания. Вынужденные колебания сборочной единицы при гармонической вибрации основания на заданной частоте с заданным ускорением

N	[рад/с]	[Гц]	[с]
1	6182.95	984.047	0.00101...
2	7243.68	1152.87	0.00086...
3	7314.26	1164.1	0.00085...
4	10723.6	1706.71	0.00058...
5	12239.2	1947.93	0.00051...
6	14752.2	2347.89	0.00042...
7	15077.5	2399.66	0.00041...
8	17482.2	2782.38	0.00035...
9	19472.6	3099.17	0.00032...
10	21022.3	3345.8	0.00029...
11	21093.2	3357.09	0.00029...
12	21726.2	3457.83	0.00028...
13	22635.5	3602.55	0.00027...
14	24325.2	3871.48	0.00025...
15	24953.4	3971.45	0.00025...
16	25148.9	4002.57	0.00024...
17	25344.9	4033.76	0.00024...
18	26990.1	4295.61	0.00023...
19	29118.7	4634.38	0.00021...
20	30710.8	4887.77	0.00020...
21	30859	4911.37	0.00020...
22	31989.3	5091.25	0.00019...
23	33631.4	5352.6	0.00018...
24	35221	5605.6	0.00017...
25	35677.7	5678.28	0.00017...
26	36313.2	5779.43	0.00017...
27	37156.8	5913.68	0.00016...
28	37312.2	5938.43	0.00016...
29	38090	6062.21	0.00016...
30	38872.5	6186.75	0.00016...
31	39626.1	6306.7	0.00015...

Результаты частот собственных колебаний сборочной единицы, полученные в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа)



Первые формы собственных колебаний, полученные в APM Structure3D (вверху) и ANSYS (внизу)

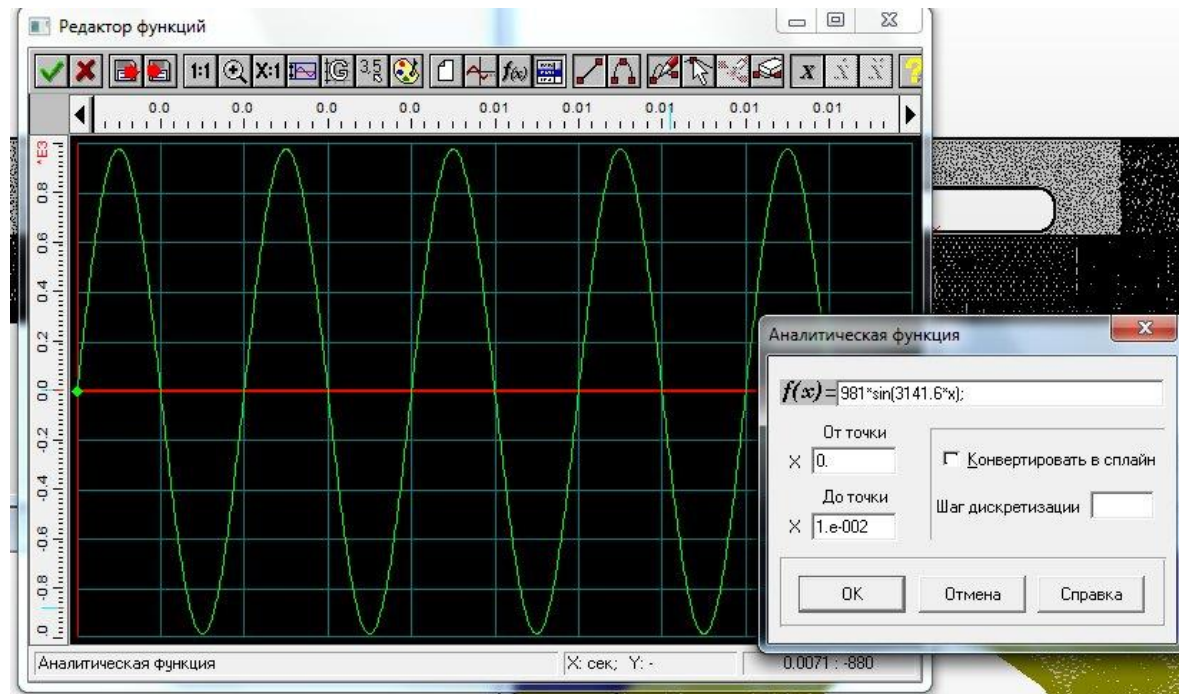
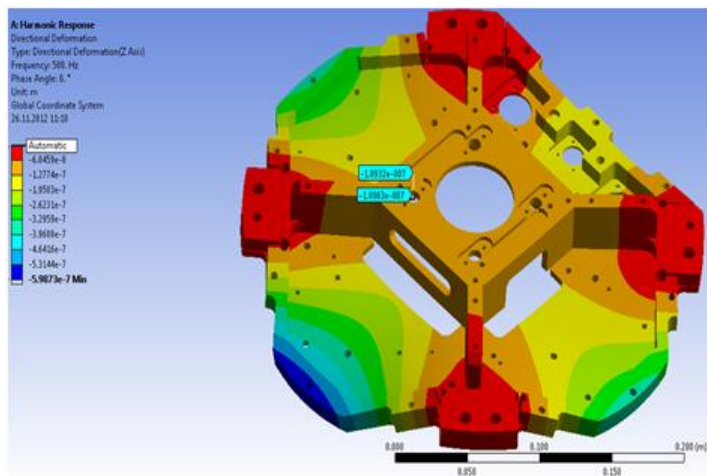
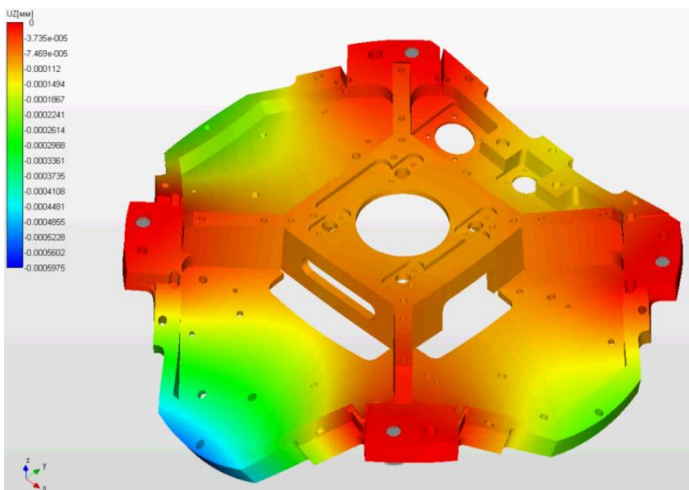


График задания функциональной зависимости вынуждающего колебания от времени



Примеры верификационных задач

Вынужденные колебания. Вынужденные колебания сборочной единицы при гармонической вибрации основания на заданной частоте с заданным ускорением



Параметр		ANSYS	APM Structure3D	Погреш- ность, %
Частоты собственных колебаний, Гц	1-ая собств. частота	951	984	3.4
	2-ая собств. частота	1111.8	1152	3.6
Максимальное перемещение при приложении нагрузки в установившемся режиме, мкм		- 0.1096	- 0.11	0.4

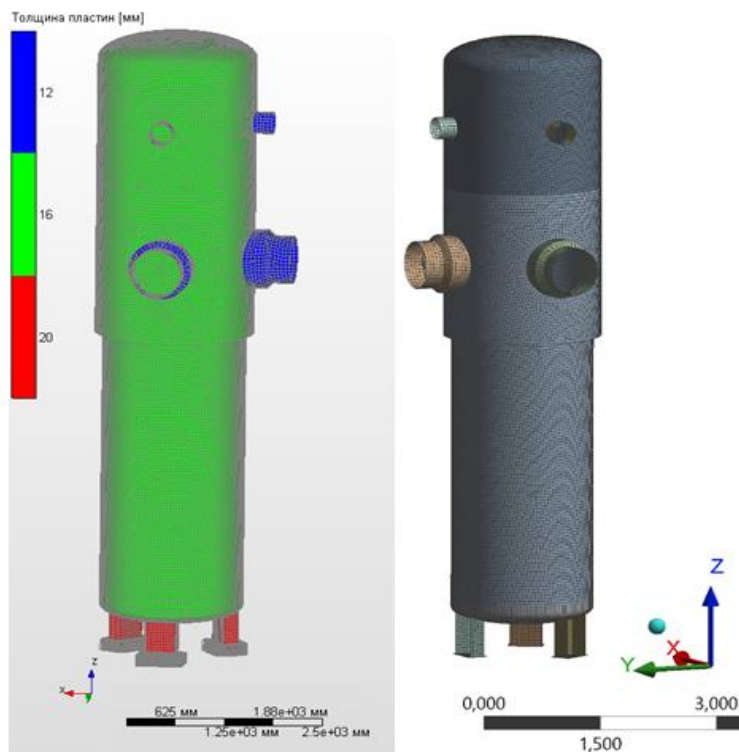
Кадры из анимированной карты перемещений перемещения по оси Z в установившемся режиме, полученные в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа)

Сравнение результатов расчета вынужденных колебаний сборочной единицы с результатами расчета в ANSYS



Примеры верификационных задач

Сейсмические воздействия. Расчет теплообменника АЭС на сейсмические воздействия, заданные спектром отклика по Y (сравнение с ANSYS)



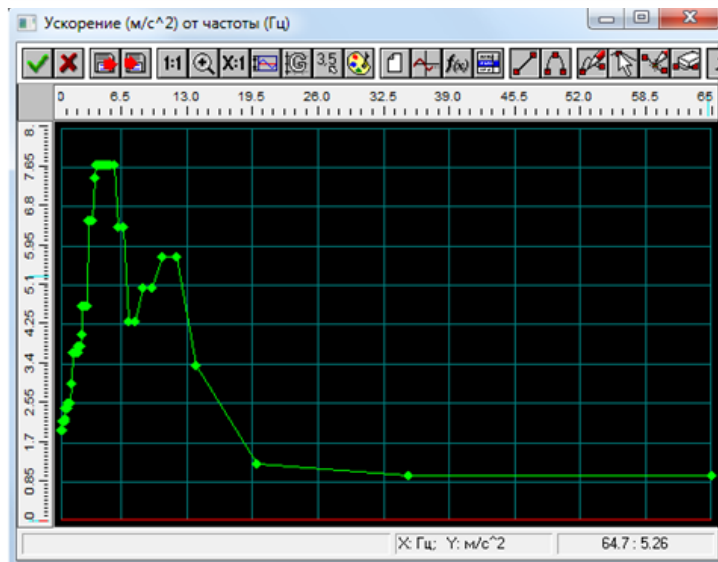
Модели теплообменника из пластинчатых элементов в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа).

Частоты собственных колебаний

Собственные частоты				Модальные массы (н.н.) и суммы модальных масс (с.н.н.) по направлениям ГСК					
N	[рад/с]	[Гц]	[с]	н.н. X [%]	с.н.н. X [%]	н.н. Y [%]	с.н.н. Y [%]	н.н. Z [%]	с.н.н. Z [%]
1	50.1364	7.97946	0.125322	53.5	53.5	14.9	14.9	0.000143	0.000143
2	50.2938	8.00451	0.12493	14.9	68.4	53.5	68.3	0.00403	0.00418
3	228.372	36.3465	0.027513	0.00117	68.4	0.000476	68.3	8.42	8.43
4	280.752	44.683	0.0223799	0.0107	68.4	0.00726	68.4	7.77	16.2
5	283.863	45.1782	0.0221346	1.05	69.5	0.0132	68.4	0.000694	16.2
6	292.882	46.6136	0.021453	0.35	69.8	1.12	69.5	0.00728	16.2
7	295.289	46.9966	0.0212781	4.23	74	0.984	70.5	0.0517	16.3
8	302.494	48.1435	0.0207712	1.91	75.9	11.9	82.4	0.0635	16.3
9	305.508	48.6231	0.0205664	7.71	83.7	1.34	83.7	0.11	16.4
10	382.107	60.8143	0.0164435	0.0247	83.7	0.0288	83.8	58.6	75

Tabular Data

Mode	Frequency [Hz]
1	7,8571
2	7,8737
3	36,237
4	44,532
5	44,816
6	46,157
7	46,662
8	48,225
9	48,47
10	60,576



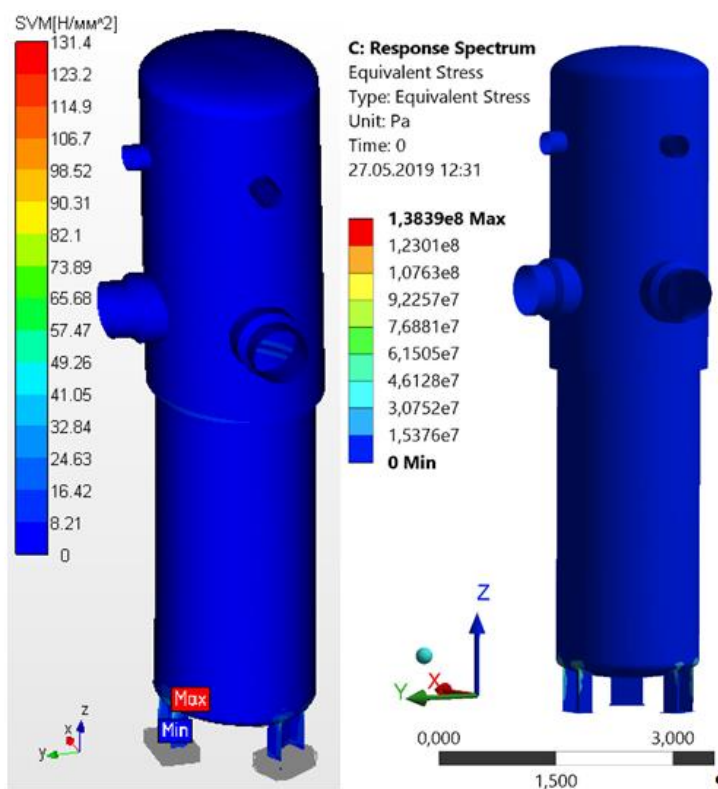
Собственные частоты модели теплообменника, полученные в APM Structure3D (слева) и в ANSYS (справа)

Спектр отклика сейсмического воздействия по оси Y в координатах ускорение – частота колебаний

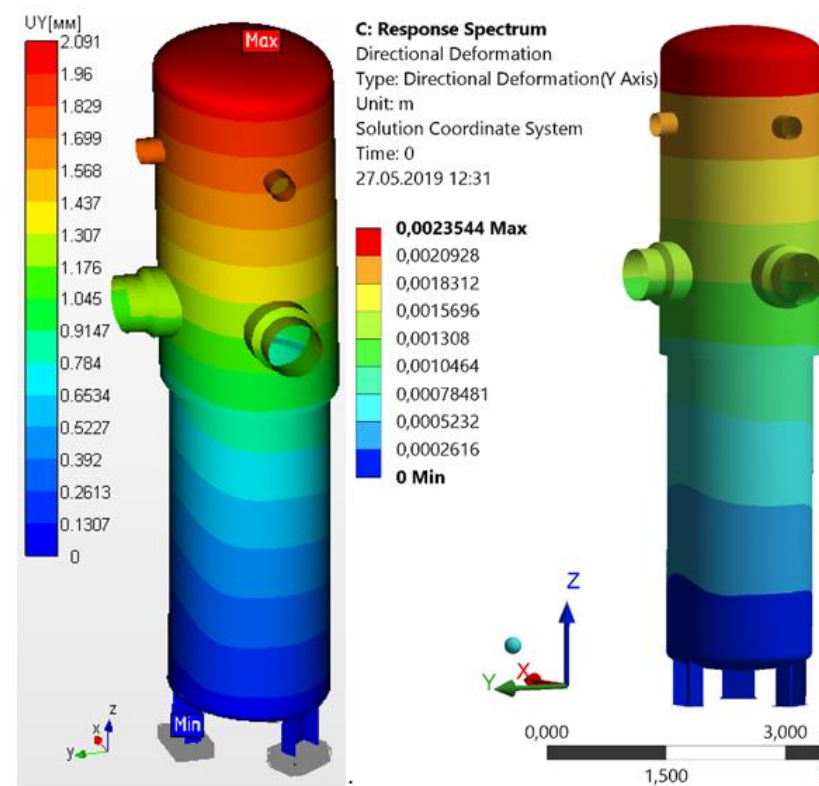


Примеры верификационных задач

Сейсмические воздействия. Расчет теплообменника АЭС на сейсмические воздействия, заданные спектром отбита по Y (сравнение с ANSYS)



Карты эквивалентных (по Мизесу) напряжений в теплообменнике, возникающих от сейсмического воздействия по оси Y, полученные в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа).



Карты суммарных перемещений в теплообменнике по оси Y, возникающих от сейсмического воздействия по оси Y, полученные в APM Structure3D (слева) и ANSYS (справа).



Примеры верификационных задач

Сейсмические воздействия. Сравнение результатов расчета теплообменника АЭС на сейсмические воздействия, заданные спектром ответа по Y (сравнение с ANSYS)

№ собств. частоты	Собственные частоты (ANSYS), Гц	Собственные частоты (APM Structure 3D), Гц	Погрешность, %
1	7.98	7.86	1.53
2	8.00	7.87	1.65
3	36.35	36.24	0.3
4	44.68	44.53	0.33
5	45.18	44.82	1.46
6	46.61	46.16	0.97
7	46.99	46.66	0.71
8	48.14	48.23	0.19
9	48.62	48.47	0.31
10	60.81	60.58	0.38

Сравнение частот собственных колебаний теплообменника, полученных в APM Structure3D и ANSYS

Вид нагрузки	Параметр напряженно-деформированного состояния	Результаты расчета (ANSYS)	Результаты расчета (APM Structure 3D)	Погрешность, %
Собственный вес	Эквивалентные напряжения, МПа	33.00	34.07	3.24
	Перемещения суммарн., мм	0.3850	0.3826	0.62
Сейсмика по оси Y	Эквивалентные напряжения, МПа	138.4	131.4	5.06
	Перемещения по оси Y, мм	2.093	2.091	0.96

Сравнение параметров НДС теплообменника нагруженного отдельно собственным весом и сейсмическим воздействием по оси Y, полученных в APM Structure3D и ANSYS



Примеры верификационных задач

Контактная задача. Расчет контактного взаимодействия цилиндрического соединения вала с отверстием – втулка с заданным натягом (задача Ламе)

Исходные данные

$d_1 = 20$ мм – диаметр внутреннего отверстия в валу;

$d = 40$ мм – диаметр вала и втулке в зоне контакта;

$d_2 = 120$ мм – внешний диаметр втулки;

$N = 60$ мкм – величина диаметрального натяга, задается геометрией контактирующих деталей;

$l = 60$ мм – длина втулки.

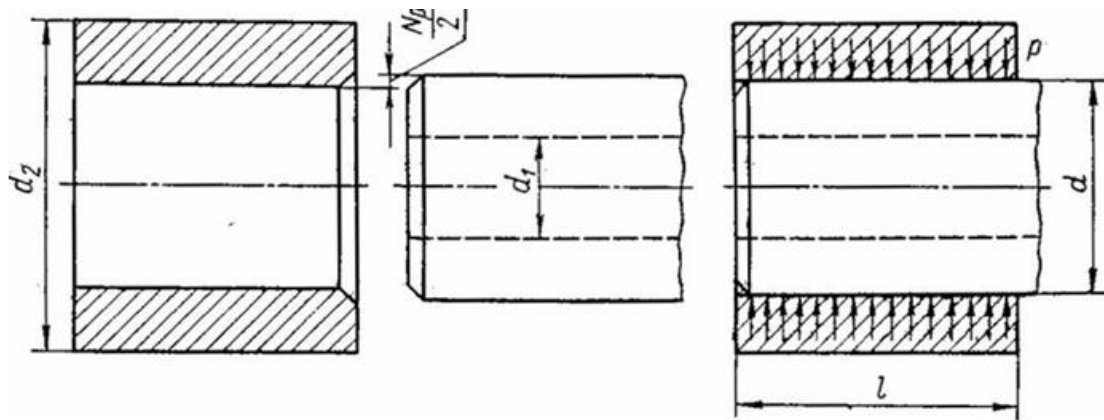
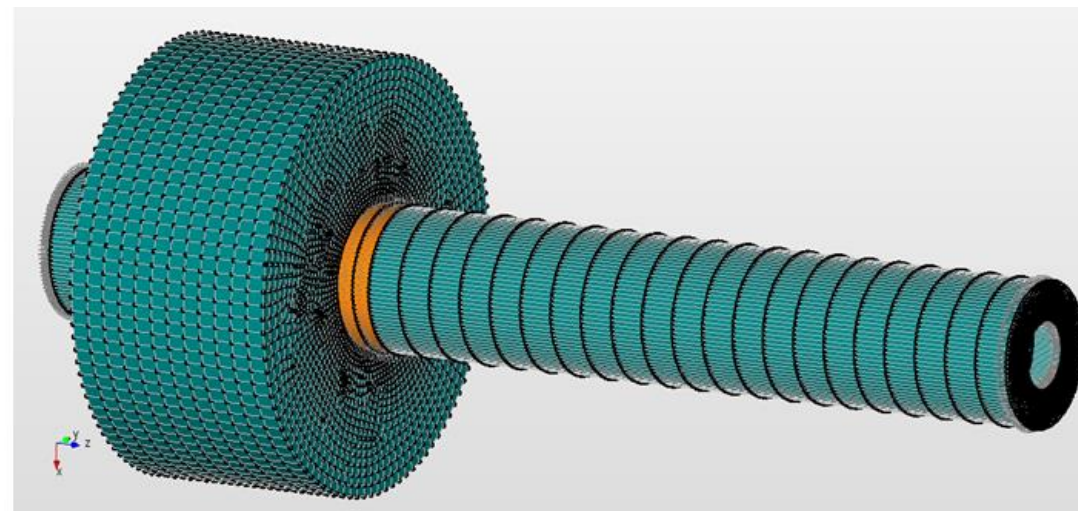


Схема соединения с натягом вала, имеющего внутреннее осевое отверстие, со втулкой

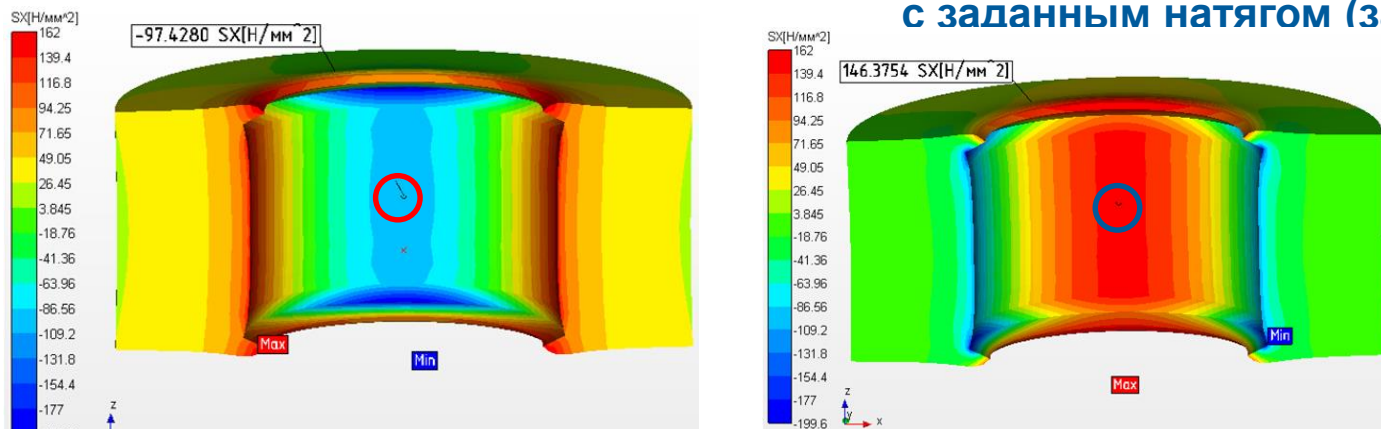


Конечно элементная модель контактирующих поверхностей типа вал – втулка с натягом

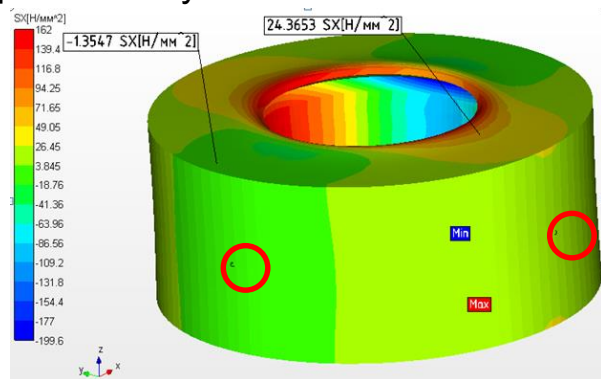


Примеры верификационных задач

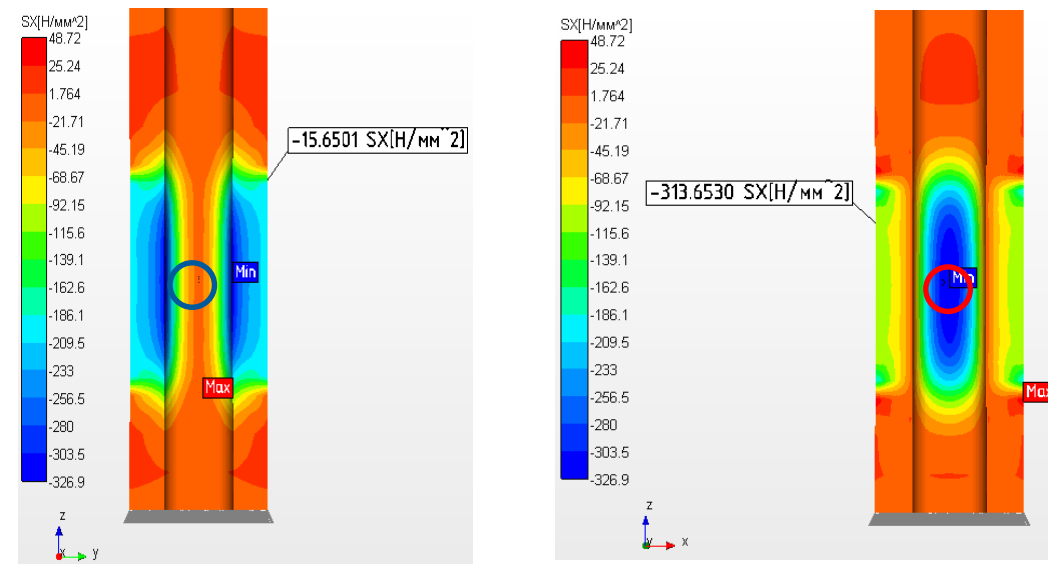
Контактная задача. Расчет контактного взаимодействия цилиндрического соединения вал – втулка с заданным натягом (задача Ламе)



Компоненты радиальных (слева) и окружных (справа) напряжений на внутренней поверхности втулки в зоне контакта с валом



Компоненты напряжений в радиальном и окружном направлениях на внешней поверхности втулки при контакте с валом

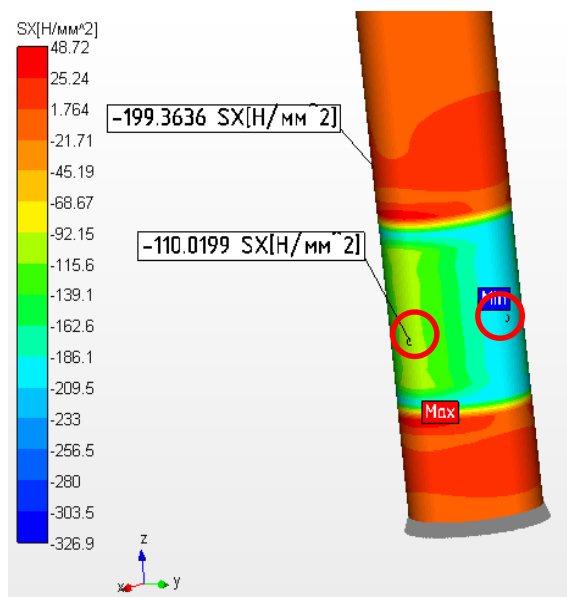


Компоненты радиальных (слева) и окружных (справа) напряжений на внутренней поверхности осевого отверстия в валу в месте контакта вала с втулкой



Примеры верификационных задач

Контактная задача. Расчет контактного взаимодействия цилиндрического соединения вал – втулка с заданным натягом (задача Ламе)



Компоненты радиальных и окружных напряжений на внешней поверхности вала в зоне контакта со втулкой

Место измерения	Радиальная компонента напряжений, МПа			Окружная компонента напряжений, МПа		
	Теоретическое значение	APM Structure3D	Погрешность, %	Теоретическое значение	APM Structure3D	Погрешность, %
Наружная поверхность втулки	0	-1.35	-	27	24.36	9.8
Внутренняя поверхность втулки	-108	-97.43	9.8	135	146.37	8.42
Наружная поверхность вала	-108	-110.02	1.87	-180	-199.36	10.75
Наружная поверхность отверстия в валу	0	-15.65	-	-288	-313.65	8.9

Сравнение результатов решения контактной задачи втулки, надетой на вал с натягом полученных в модуле APM Structure3D, с теоретическими



Результат аттестации базового расчетного модуля APM Structure3D в Ростехнадзоре в 2019 году

Погрешность, обеспечиваемая программой для ЭВМ
в области ее применения



Параметр	Значение погрешности, %
Перемещения и углы поворота (при статических расчетах)	± 5,7
Усилия (при статических расчетах)	± 6,3
Напряжения (при статических расчетах)	± 6,9
Напряжения и перемещения (при сейсмических воздействиях)	± 16
Собственные частоты колебаний	± 10
Коэффициент запаса по устойчивости	± 8
Перемещения (при геометрически нелинейном расчете)	± 15
Напряжения и перемещения в зоне контакта	± 25
Силовые факторы (при геометрически нелинейном расчете)	± 12



Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (495) 120-58-10
Internet: www.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**