

Валидация усталостного расчёта на примере конечно-элементного анализа участка трубопровода

Р.И. Абдурашитов,
к.т.н., artem_abd@mail.ru,
ООО НТЦ «АПМ», г. Орёл,
М.Ю. Ростовцев,
rostovcev@apm.ru,
ООО НТЦ «АПМ», г. Москва

Введение и актуальность работы

В настоящий момент отечественные организации, работающие с CAE-системами прочностного анализа, повсеместно столкнулись с необходимостью импортозамещения программного обеспечения. Разработка отечественной САПР прочностного анализа на базе новейших достижений в области компьютерного моделирования является важнейшей стратегической задачей отечественных разработчиков программного обеспечения.

Самыми известными зарубежными САПР являются ANSYS, Nastran, NX, HyperMesh, Abaqus и пр. Эти системы оперируют широким набором как типовых конечных элементов, а так и вычислительных методов для различных типов анализа. Использование уже накопленного опыта совместно с новейшими вычислительными методами и алгоритмами позволило создать отечественный программный комплекс прочностного анализа конструкций APM Structure3D.

Верификация и валидация расчётных программ необходимы для создания надёжного промышленного программного обеспечения. Методы оценки надёжности полученных результатов обычно основываются на сравнении эталонных решений с решениями, полученными с помощью созданного программного продукта. В качестве эталонных обычно выступают аналитические результаты, а в тех случаях, когда получить аналитическое решение не представляется возможным, эталоном для сравнения служит аттестованное программное обеспечение других производителей. Результаты верификационных тестов представляются в виде отклонения от эталонного решения, выраженного в процентах.

В данной работе рассмотрены результаты численных испытаний созданного модуля усталостного расчёта.

1. Объект исследования

Участок трубопровода, см. рис.1, круглого сечения, нагружается собственным весом, изгибом в вертикальной плоскости, растяжением и внутренним давлением. Требуется провести статический расчёт напряжённо-деформированного состояния, на основе которого осуществить усталостный расчёт.

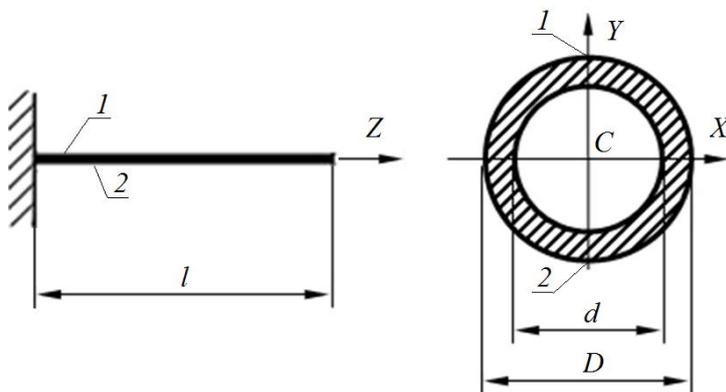


рис. 1 Схема участка трубопровода и точек верификации

Таблица 1

Исходные данные

Обозначение	Значение	Размерность	Комментарий
D	5.2e-2	м	внешний диаметр трубы
d	4.4e-2	м	внутренний диаметр трубы
T	4e-3	м	толщина стенки трубопровода
D_{cp}	4.8e-2	м	средний диаметр для пластинчатой модели
L	2	м	длина участка трубопровода
E	2e5	МПа	модуль упругости материала трубопровода
μ	0.3	-	коэффициент Пуассона
ρ	7850	кг/м ³	плотность материала трубопровода
F_y	-50	Н	вертикальная сила на свободном краю трубы
F_z	1e+4	Н	растягивающая сила на свободном краю трубы
p	3e+6	Па	величина избыточного внутреннего давления в трубе
σ_u	410	МПа	предел прочности

Обозначение	Значение	Размерность	Комментарий
σ_y	235	МПа	предел текучести
K_f	1	-	коэффициент пересчёта предела выносливости

1.1. Конечно-элементная модель

Для моделирования участка трубопровода использовались 3-х и 4-х узловые пластинчатые элементы, а так же твёрдотельные тетраэдрические (4-х узловые) и гексаэдрические (8-и узловые) элементы, по одному КЭ по толщине трубы, см. Таблица 1.

Таблица 2

Результаты разбиения модели различными КЭ

№	Тип конечных элементов	Количество узлов	Количество элементов
Оболочечные конечные элементы			
1	Треугольные	5704	11370
2	Четырёхугольные	4752	4731
Твёрдотельные конечные элементы			
3	Тетраэдры	35193	105314
4	Гексаэдры	68160	54400

В качестве эталонного ПО, с которым сравнивались результаты расчёта, использовался ANSYS v.17.2 (аттестационный паспорт №145 от 31.10.2002 для версии 5.2 - 5.7) [1]. В ANSYS была создана аналогичная модель с аналогичными типами КЭ.

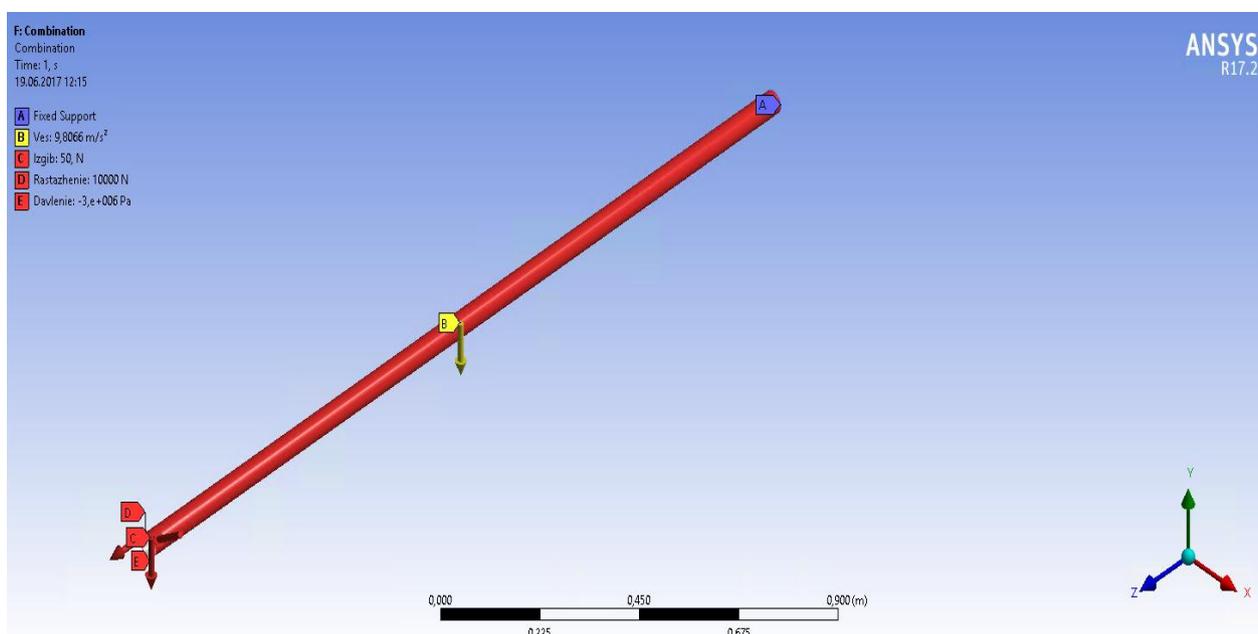


рис. 2 Расчётная модель трубы для комбинации нагрузок в системе ANSYS

1.2. Подобласть верификации

Для комбинации 4-х нагрузок и для каждой нагрузки в отдельности в двух точках, см. рис. 1, на внешней поверхности трубопровода [X, Y, Z]:

- точка 1 – сверху, расстояние 10% от заделки, координаты: [0; 2.4e-2; 0.2] м;
- точка 2 – снизу, расстояние 20% от заделки, координаты: [0; -2.4e-2; 0.4] м.

2. Результаты статического расчёта

Для каждого вида нагрузки и их комбинации, для каждого вида КЭ, для точек 1 и 2 были вычислены результаты статики, которые затем были использованы в усталостном многоцикловом (S-N) расчёте. В Таблице 1 приведены для точки 1 теоретические эквивалентные значения напряжений, величины, вычисленные в КЭ-системах ANSYS и Structure3D, относительная погрешности этих величин по сравнению с теоретическими значениями ϵ_{A-T} и ϵ_{S-T} , а так же значения относительного расхождения между вычисленными результатами систем ANSYS и Structure3D. В Таблице 2 приведены результаты для точки 2.

Эквивалентные значения напряжений вычислялись по Мизесу. Наибольшие погрешности для точки 1 и точки 2 не превышают 9% как для системы ANSYS, так и Structure3D. Наибольшая погрешность прослеживается для нагрузки "Давление", соответствующее приложению избыточного давления внутри трубы. Для пластинчатых КЭ теоретические значения были посчитаны по формуле для тонкой трубы, а для объёмных КЭ теоретические значения были посчитаны по формуле для толстой трубы. Наибольшее расхождение прослеживается для треугольных пластинчатых элементов для всех случаев.

Таблица 3

Сравнение эквивалентных по Мизесу напряжений в МПа моделей с различными КЭ в Точке 1

Нагрузка	Теория	КЭ	ANSYS	ϵ_{A-T}	Structure3D	ϵ_{S-T}	Расхождение
Вес	11,1020	Triang	11,0430	-0,53%	11,5800	4,31%	4,86%
		Quad	11,4230	2,89%	11,3704	2,42%	-0,46%
		Tetra	10,9150	-1,68%	10,9156	-1,68%	0,01%
		Hexa	11,2670	1,49%	11,2193	1,06%	-0,42%
Изгиб	13,3770	Triang	13,2330	-1,08%	14,4304	7,87%	9,05%
		Quad	13,7260	2,61%	13,6491	2,03%	-0,56%
		Tetra	13,0620	-2,35%	13,0622	-2,35%	0,00%
		Hexa	13,5590	1,36%	13,5009	0,93%	-0,43%
Растяжение	16,5790	Triang	16,8720	1,77%	17,4700	5,37%	3,54%
		Quad	16,6550	0,46%	16,6797	0,61%	0,15%
		Tetra	16,5580	-0,13%	16,5764	-0,02%	0,11%
		Hexa	16,6860	0,65%	16,6895	0,67%	0,02%
Давление	19,5000	Triang	17,8450	-8,49%	18,2381	-6,47%	2,20%
		Quad	17,7540	-8,95%	18,0418	-7,48%	1,62%
	15,1250	Tetra	15,8440	4,75%	15,8441	4,75%	0,00%
		Hexa	15,1940	0,46%	15,2293	0,69%	0,23%
Комбинация нагрузок	35,5720	Triang	35,1210	-1,27%	37,0039	4,03%	5,36%
		Quad	36,3520	2,19%	35,7105	0,39%	-1,76%
	35,9660	Tetra	36,4540	2,48%	36,4746	2,54%	0,06%
		Hexa	36,5090	2,63%	36,5104	2,64%	0,00%

Таблица 4

Сравнение эквивалентных по Мизесу напряжений в МПа моделей с различными КЭ в Точке 2

Нагрузка	Теория	КЭ	ANSYS	ϵ_{A-T}	Structure3D	ϵ_{S-T}	Расхождение
Вес	8,7721	Triang	8,9687	2,24%	9,4668	7,92%	5,55%
		Quad	9,0525	3,20%	8,9804	2,37%	-0,80%
		Tetra	8,5692	-2,31%	8,5722	-2,28%	0,04%
		Hexa	8,9293	1,79%	8,8799	1,23%	-0,55%
Изгиб	11,8910	Triang	12,0730	1,53%	12,7419	7,16%	5,54%
		Quad	11,8930	0,02%	12,1296	2,01%	1,99%
		Tetra	11,5380	-2,97%	11,5377	-2,97%	0,00%
		Hexa	12,0710	1,51%	12,0108	1,01%	-0,50%
Растяжение	16,5790	Triang	16,7490	1,03%	17,8199	7,48%	6,39%
		Quad	16,6520	0,44%	16,6135	0,21%	-0,23%
		Tetra	16,5820	0,02%	16,5538	-0,15%	-0,17%
		Hexa	16,6860	0,65%	16,6825	0,62%	-0,02%
Давление	19,5000	Triang	17,9100	-8,15%	18,3116	-6,09%	2,24%
		Quad	17,7550	-8,95%	17,8283	-8,57%	0,41%
	15,1250	Tetra	15,4500	2,15%	15,4505	2,15%	0,00%
		Hexa	15,1920	0,44%	15,2919	1,10%	0,66%
Комбинация нагрузок	21,8310	Triang	20,2510	-7,24%	20,7800	-4,81%	2,61%
		Quad	20,0580	-8,12%	20,3385	-6,84%	1,40%
	17,5280	Tetra	17,5160	-0,07%	17,5355	0,04%	0,11%
		Hexa	17,7010	0,99%	17,7498	1,27%	0,28%

3. Постановка задачи усталостного расчёта

На основе анализа параметров разбиения конечно-элементной сетки и анализа результатов статического расчёта в двух системах ANSYS и Structure3D была для дальнейших расчётов выбрана четырёх узловая КЭ схема. Это вызвано тем, что модель с твёрдотельными КЭ имеет большее на порядок число как узлов, так и самих элементов, см. Таблицу 2, что значительно сказывается на потребностях в оперативной памяти и на времени расчёта. Трёх узловая схема при незначительном увеличении числа узлов, и в 2,4 раза большем числе КЭ обладает пониженной точностью по сравнению с четырёх узловой, см. Таблицу 3 и Таблицу 4.

Для дальнейших расчётов была использована точка 1, поскольку результаты по точности практически ничем не отличаются от значений в точке 2.

Основные термины, определения и обозначения по сопротивлению усталости рассмотрены в [2].

Для приведения напряжений при несимметричной нагрузке [3,4,5] были использованы методы Зодерберга, Гудмана и Гербера, метод SN-none игнорирует среднее значение напряжений цикла регулярного нагружения. Кривая Вёлера задаётся по точкам из Таблицы 5, при этом использовался линейный метод интерполирования для промежуточных точек кривой.

Для проведения усталостного расчёта были рассмотрены 4 различных вида регулярного усталостного нагружения, которые характеризуются различными значениями коэффициента асимметрии R , см. Таблицу 6.

Точки графика кривой усталости Вёлера

№	Число циклов	Напряжения, МПа
1	1	500
2	2e+4	400
3	1e+9	140

Таблица 6

Параметры регулярных усталостных нагружений

№ нагружения	Козф. асимметрии R	Скалярный фактор	Максимум	Минимум
1	-1	11.8	11.8	-11.8
2	0	8	8	0
3	∞	-13	0	-13
4	-1/2	12	12	-6

4. Результаты усталостного расчёта

Результаты усталостного расчёта четырёх различных регулярных нагружений представлены в Таблице 7. Первое нагружение симметрично и не требует приведения. Третье нагружение характеризуется отрицательным средним значением напряжения в цикле, поэтому три метода приведения дают одинаковое значение, и только параболическое приближение Герберга даёт иное итоговое значение.

Таблица 7

Сравнение эквивалентных по Мизесу напряжений в МПа регулярных усталостных нагружений для различных методов приведения к симметричной нагрузке

№ нагружения	R	Метод	ANSYS	Structure3D	Расхождение
1	-1	-	425,40	421,30	-0,96%
2	0	SN-none	144,20	144,40	0,14%
		Зодерберг	373,23	375,00	0,47%
		Гудман	222,44	231,10	3,89%
		Гербер	164,56	165,00	0,27%
3	∞	SN-none	234,33	234,80	0,20%
		Зодерберг			
		Гудман			
		Гербер	348,01	349,30	
4	-1/2	SN-none	324,46	325,00	0,17%
		Зодерберг	601,10	603,20	0,35%
		Гудман	440,71	441,90	0,27%
		Гербер	348,72	349,40	0,19%

Выводы

Полученные результаты усталостного S-N расчёта регулярного нагружения при различных значениях асимметрии цикла для выбранной верификационной точки показали расхождение менее 4% с результатами, полученными в системе ANSYS. Усталостный расчёт базируется на результатах статки, погрешность расчёта которой не превысила 9% от теоретического значения для двух рассматриваемых точек и для четырёх рассматриваемых видов КЭ-сетки.

Более сложные виды нагрузок, в том числе блочный и случайный, основываются на результатах регулярного нагружения, но для которых необходимо проводить ещё и схематизацию [5], для которой тоже необходимо проводить верификацию, что является темой для дальнейших исследований.

Таким образом, отечественная система КЭ-анализа "APM Structure3D" от НТЦ АПМ на статическом и усталостном расчётах показывает сходные с системой ANSYS результаты, с расхождением менее 9%. Полученные данные могут быть использованы для проведения валидации других систем КЭ-анализа.

Литература

1. ANSYS release 11.0 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс] : ANSYS Inc. — Электрон. дан. и прог. — [Б. м.], 2007. — 2 электрон, опт. диск (DVD-ROM).
2. ГОСТ 23.207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. — М. : Изд-во стандартов, 1981. - 48 с.
3. Берендеев Н.Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно-телекоммуникационных систем и технологий». [Электронный ресурс] / Н.Н. Берендеев. — Электрон. текстовые дан. и граф. дан — Нижний Новгород: Б. изд., 2006. — 82 с. — Режим доступа: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/4.pdf>, свободный.
4. Форрест П. Усталость металлов. — М. : Машиностроение, 1968. — 352 с.
5. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения — СПб. : Политехника, 1993. — 391 с.
6. ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — М. : Изд-во стандартов, 1983. - 25 с.