

УДК 69.04; 62.26

doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-34-43

Валидация решений динамического анализа трубопроводных систем сравнением результатов вычислений, полученных в отечественном комплексе APM StructFEM и в системе ANSYS, применительно к задачам сейсмостойкости

В.В. Шелофаст^{1,2}, В.В. Шелофаст², А.А. Замрий²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² ООО НТЦ «АПМ»

Validation of Solutions for Dynamic Analysis of Pipeline Systems by Comparing the Results of Calculations Obtained in the Russian CAE system APM StructFEM and in ANSYS as Applied to Seismic Resistance Problems

V.V. Shelofast^{1,2}, V.V. Shelofast², A.A. Zamriy²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² OOO APM Research Center

Удобным инструментом для анализа трубопроводных систем можно считать моделирование трубопроводов специальными трубчатыми конечными элементами. Это существенно уменьшает размерность решаемой задачи и значительно ускоряет время выполнения расчетных процедур. Эти преимущества объясняются особенностью моделирования, которое предполагает использование модели трубы в форме стержня, имеющего кольцевое поперечное сечение. Приведены решения задачи динамического анализа трубопроводных систем, включая анализ отклика трубопровода на сейсмическое воздействие. Выполнена оценка надежности получаемых динамических решений с использованием отечественного программного комплекса APM StructFEM.

Ключевые слова: трубчатый конечный элемент, матрица жесткости, матрица масс, карты эквивалентных перемещений, карты эквивалентных напряжений, частоты собственных колебаний

Modeling pipelines using special tubular finite elements is a convenient tool for the analysis of pipeline systems. Such a formulation significantly reduces the dimension of the problem being solved and significantly accelerates the time required to perform calculation procedures. These advantages can be explained by a modeling feature that involves the use of a pipe model in the form of a rod having an annular cross section. This paper presents solutions to the problem of dynamic analysis of pipeline systems, including analysis of the pipeline response to seismic effects. The work was performed to assess

the reliability of the dynamic solutions obtained using the Russian CAE system APM StructFEM.

Keywords: tubular finite elements, stiffness matrix, mass matrix, reactions, displacements, stresses, natural frequencies

Создание отечественных расчетных программных комплексов (ПК) предполагает оценку их надежности, которую можно выполнить сравнительным анализом получаемых решений по отношению к эталонному. Таким эталоном могут быть либо данные аналитических вычислений (если они получены ранее), либо численные значения, определенные с использованием сертифицированной внешней среды.

Исследована точность определения динамических характеристик при анализе частот и форм собственных колебаний трубопроводных систем, и выполнен анализ их сейсмостойкости. В качестве эталона использованы решения, полученные в программной системе ANSYS производства США.

Следует отметить, что оценка параметров сейсмостойкости является комплексной задачей, включающей в себя расчет частот и форм собственных колебаний и анализ сейсмостойкости. По этой причине анализ сейсмостойкости является исчерпывающим примером, способным выполнить комплексную оценку надежности, получаемых инженерных решений.

Определение частот и форм собственных колебаний. Задача определения частот и форм собственных колебаний в общей постановке имеет известное решение, в то время как его реализация применительно к трубопроводной арматуре сложной геометрической формы представляет практический интерес.

Рассмотрим динамическую систему без учета демпфирования и внешних возмущающих сил. В этом случае уравнение для описания движения представляется в виде [1–15]

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{0\}, \quad (1)$$

где $[M]$ — матрица масс системы; $[K]$ — матрица жесткости системы; $\{q\}$ — вектор перемещения.

Необходимо отметить, что вид матрицы жесткости зависит от таких факторов, как геометрические параметры трубопровода, приложенная к нему нагрузка, условия закрепления и т. п. Эти матрицы использованы при создании численных решений динамики валопроводов.

Решение системы уравнения (1) для расчета линейных свободных колебаний можно представить в форме гармонических колебаний:

$$\{q\} = \{\varnothing_i\} \cos \omega_i t, \quad (2)$$

где $\{\varnothing_i\}$ — собственный вектор, представляющий собой амплитуду колебаний i -й частоты; ω_i — круговая i -я частота; t — время.

Подставляя решение (2) в уравнение свободных колебаний (1), получаем

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\varnothing_i\} = 0. \quad (3)$$

Очевидно, что решение уравнения (3) становится возможным, когда его левая часть оказывается равной нулю. Таким образом, решение этой задачи сводится к решению общей задачи о собственных значениях:

$$\det[K] - \omega^2[M] = 0. \quad (4)$$

Для решения характеристического уравнения (4) применяют метод итерации подпространств.

В большинстве стран мира для анализа сейсмического воздействия рекомендовано использовать спектральный метод расчета, так как среди прочих он является самым эффективным. При реализации этого метода принимают во внимание каждую частоту собственных колебаний, полученную в модальном анализе.

В основе сейсмического расчета лежит линейно-спектральный анализ, который выполняет поиск вклада каждой формы собственных колебаний в результирующее возмущение от входного спектра отклика. Очевидно, что в качестве первого этапа сейсмического расчета выступает модальный анализ.

Для каждой формы собственных колебаний определяют максимальное ускорение, полученное по результатам заданного спектра отклика. С помощью принципа линейного суммирования находят результирующее ускорение сложением составляющих от каждой из форм собственных колебаний. Ускорение легко пересчитывают в силовые, напряженные и деформационные характеристики рассматриваемой конструкции.

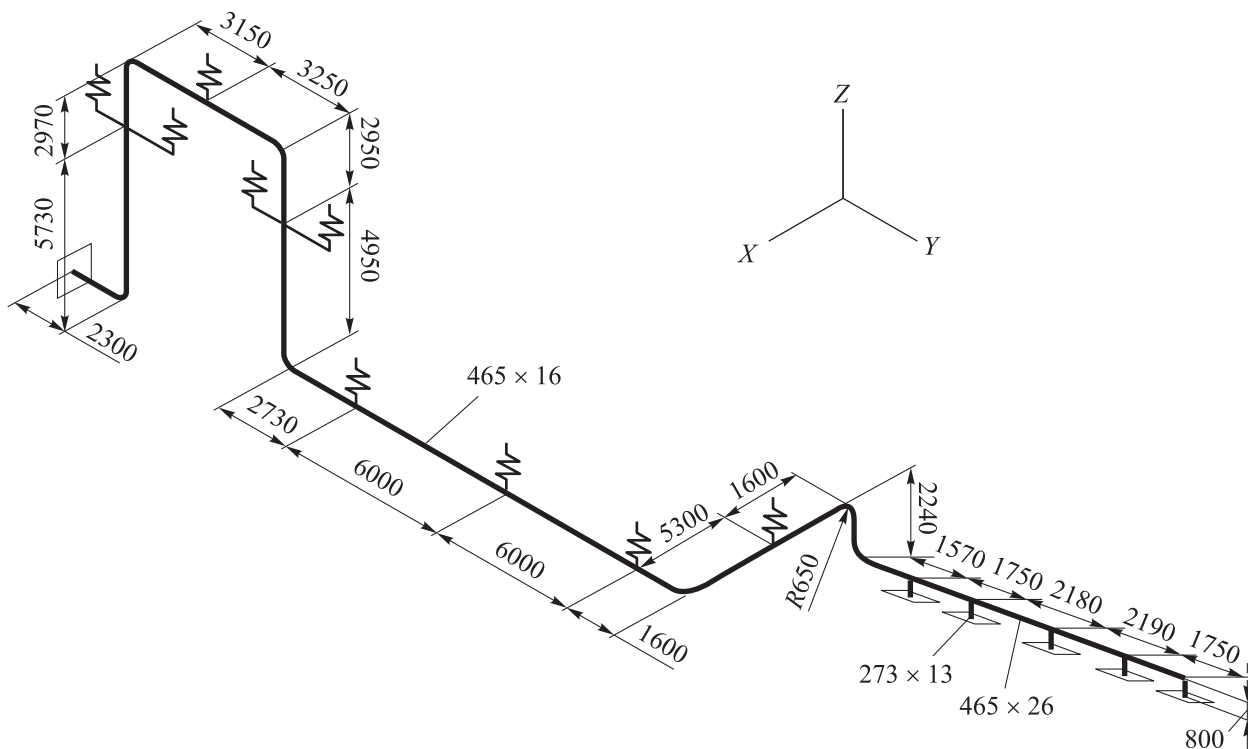


Рис. 1. Схема изогнутого трубопровода на упругих и жестких опорах для расчета на сейсмическое воздействие

Описанные методы лежат в основе отечественного ПК APM StructFEM. Для подтверждения его надежности выполнены многочисленные тестовые испытания для задач прочности, устойчивости и др.

Цель работы — оценить надежность полученных динамических решений при анализе сейсмостойкости составной трубопроводной арматуры с использованием ПК APM StructFEM.

Сейсмический расчет изогнутого трубопровода на упругих и жестких опорах с определением частот его собственных колебаний. Для валидации получаемых решений проведем сейсмический расчет изогнутого трубопровода на упругих и жестких опорах, предварительно определив, частоты и формы его собственных колебаний. Расчет выполним линейно спектральным методом.

К трубопроводу, изображенному на рис. 1, приложены собственный вес, внутреннее давление и сейсмическая нагрузка, заданная спектром ответа по оси X . Необходимо определить следующие параметры трубопровода:

- частоты и формы собственных колебаний;
- суммарные перемещения и напряжения по Мизесу (эквивалентные напряжения);

- реакции в опорах, возникающие под действием сейсмической нагрузки, определяемой первыми двадцатью низшими формами колебаний, значения частот которых лежат в заданном спектре сейсмического воздействия.

Физико-механические характеристики материалов трубопровода

Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3
Плотность, кг/м ³	7800
Коэффициент линейного расширения, град ⁻¹	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Геометрические параметры трубопровода приведены в табл. 1, а его граничные условия — в табл. 2.

Сейсмическое воздействие задавалось спектром ответа по оси X глобальной системы координат. Спектр ответа в координатах «ускорение — частота», действующий по оси X трубопровода, приведен на рис. 4.

Для моделирования трубопровода использованы стержневые элементы Tube, прямолинейные и криволинейные участки которых, изображены на рис. 4.

При верификации необходимо определить частоты и формы собственных колебаний рас-

Таблица 1

Геометрические характеристики трубопровода

Номер (цвет) участка согласно рис. 2 и 3	Внешний диаметр, мм	Толщина стенки, мм
1 (■)	465	16
2 (■)	465	26
3 (■)	273	13

Таблица 2

Граничные условия трубопровода

Номер узла согласно рис. 2	Закрепление
4, 18, 19, 20, 21, 22	Жесткое защемление
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Упругое закрепление по оси Z (жесткость $1,0 \cdot 10^5$ Н/мм)

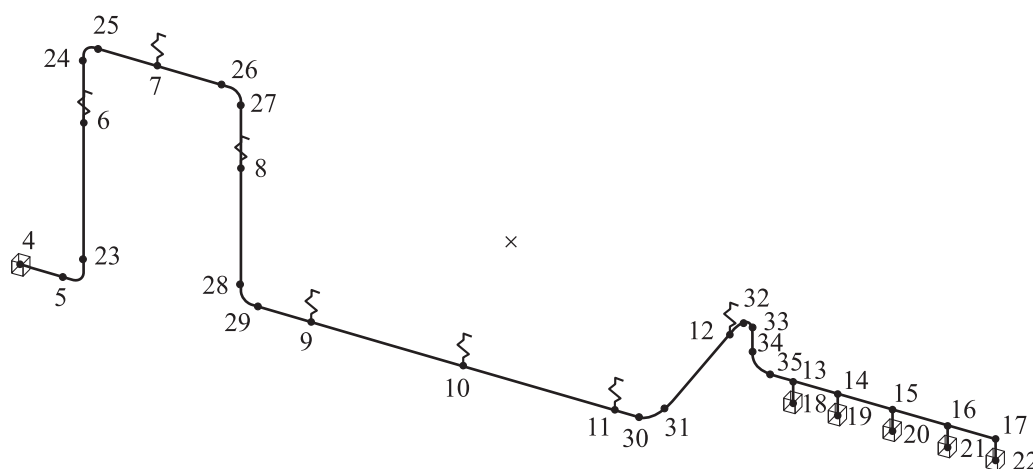


Рис. 2. Схема установки упругих и жестких опор на трубопроводе

смаатриваемой конструкции, напряжения и перемещения элементов трубопроводных систем, а также выполнить расчет трубопровода на сейсмическое воздействие, заданное спектром отклика по координате X. Результат сейсмического воздействия определяется как реакция трубопровода на этот тип внешней нагрузки.

Наиболее точные результаты достигаются при использовании аналитических решений. Однако обзор литературы не выявил таких решений для предложенной конструкции. Вследствие этого в качестве эталонного программного обеспечения выбрана система ANSYS версии 17.2.

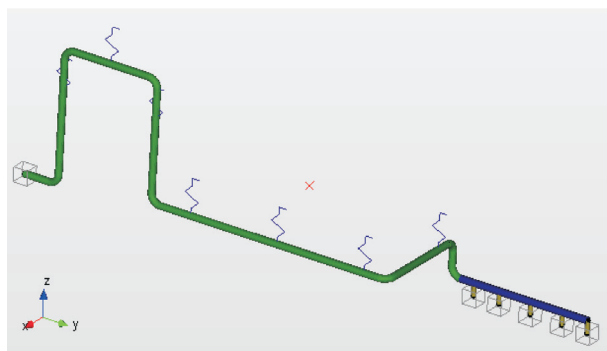


Рис. 3. Конечно-элементная модель трубопровода с упругими и жесткими опорами из трубопроводных элементов, полученная в ПК APM StructFEM

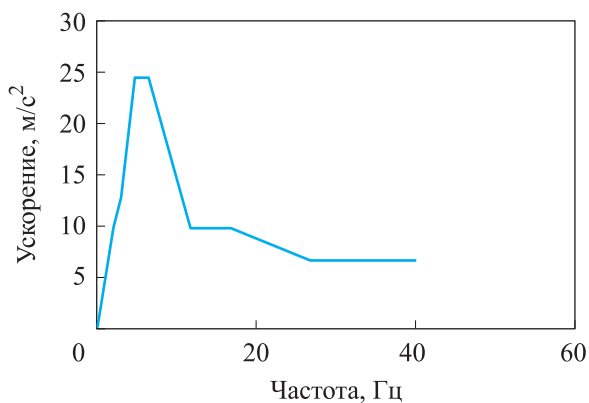


Рис. 4. Спектр отклика в координатах «ускорение — частота», действующий по оси X

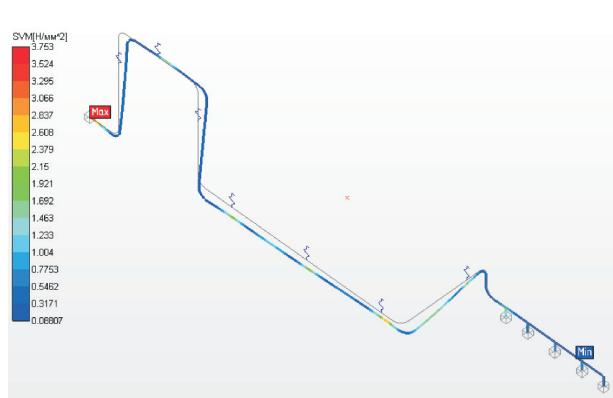
Собственные частоты				Модальные массы (м.м.) и суммы модальных масс (с.м.м.) по направлениям ГСК					
N	[рад/с]	[Гц]	[с]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]	м.м. Y [%]	с.м.м. Y [%]	м.м. Z [%]	с.м.м. Z [%]
1	7.96292	1.26734	0.789055	43.7	43.7	7.92	7.92	5.24e-05	5.24e-05
2	11.2003	1.78258	0.560985	3.46	47.1	42.7	50.6	0.000666	0.000718
3	14.5381	2.31381	0.432187	1.56	48.7	12.3	62.9	2.93e-08	0.000718
4	24.3753	3.87945	0.257768	0.0019	48.7	0.862	63.8	0.000776	0.00149
5	38.77	6.17044	0.162063	3.35	52	0.0167	63.8	0.000359	0.00185
6	43.5127	6.92527	0.144399	10.4	62.5	0.422	64.2	4.2e-06	0.00186
7	66.268	10.5469	0.0948148	9.04	71.5	0.293	64.5	0.000418	0.00228
8	98.2204	15.6323	0.0639703	0.503	72	4.08	68.6	0.00484	0.00712
9	132.32	21.0594	0.0474847	1.98	74	0.0214	68.6	0.000352	0.00747
10	144.011	22.9201	0.0436298	0.000532	74	2.06	70.7	0.167	0.174
11	152.17	24.2187	0.0412905	1.26	75.3	0.0446	70.7	0.00625	0.18
12	182.999	29.1252	0.0343345	0.0243	75.3	0.0173	70.8	2.59	2.77
13	186.757	29.7233	0.0336437	0.00545	75.3	0.516	71.3	0.854	3.62
14	207.939	33.0946	0.0302164	0.282	75.6	0.0506	71.3	0.0794	3.7
15	248.147	39.4938	0.0253204	0.0053	75.6	0.00307	71.3	8.9	12.6
16	263.192	41.8883	0.023873	0.0259	75.6	0.00121	71.3	0.109	12.7
17	271.84	43.2646	0.0231136	0.458	76.1	0.114	71.5	0.259	13
18	285.172	45.3865	0.022033	1.11e-05	76.1	0.00251	71.5	15	28
19	291.631	46.4146	0.021545	0.00694	76.1	1.14e-05	71.5	39.8	67.7
20	300.238	47.7844	0.0209273	0.437	76.5	0.213	71.7	0.139	67.9

SET	TIME/FREQ
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

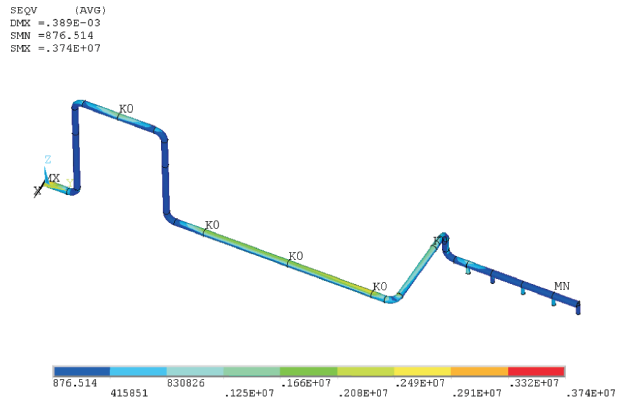
а

б

Рис. 5. Значения частот собственных колебаний модели трубопровода, полученные в ПК APM StructFEM (а) и ANSYS (б)



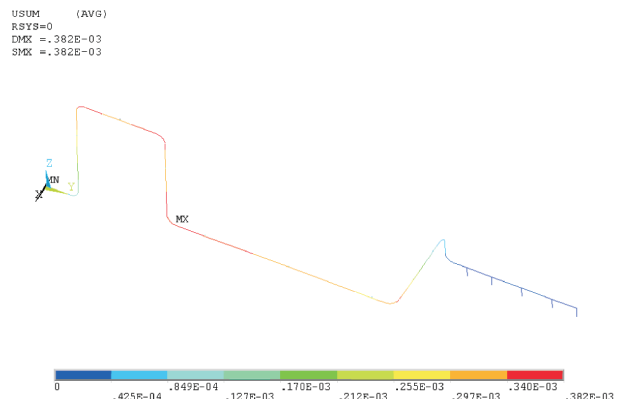
а



б



в



г

Рис. 6. Карты эквивалентных напряжений (а, б) и суммарных перемещений (в, г) в трубопроводе, возникающих под действием собственного веса, полученные в разных ПК: а, в — APM StructFEM; б, г — ANSYS

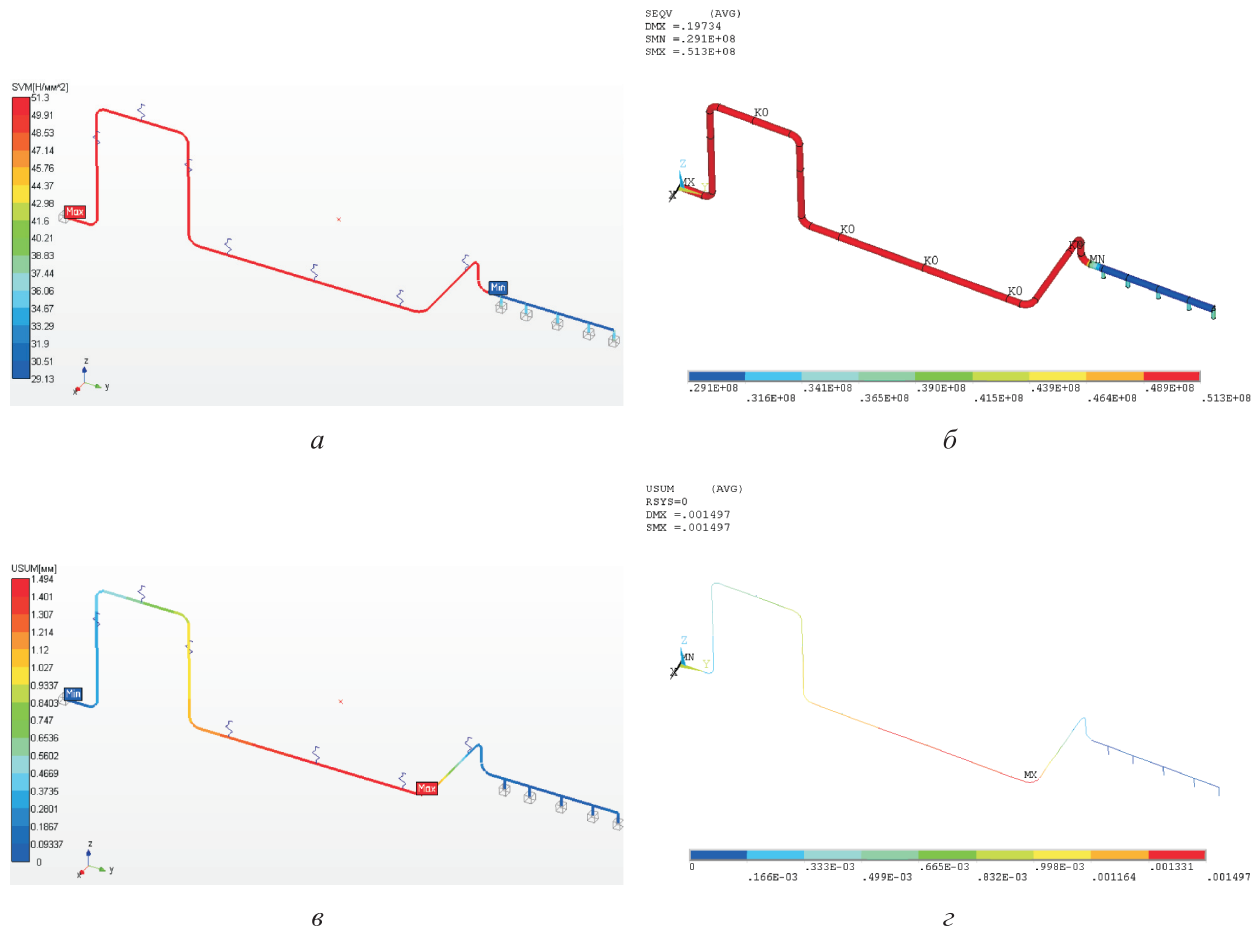


Рис. 7. Карты эквивалентных напряжений (а, б) и суммарных перемещений (в, г) в трубопроводе, возникающих под действием внутреннего давления, полученные в разных ПК: а, в — APM StructFEM; б, г — ANSYS

Перед расчетом на сейсмическое воздействие вычислялись частоты собственных колебаний модели трубопровода. На рис. 5, а и б приведены их значения, полученные в ПК APM StructFEM и ANSYS. В среде APM StructFEM частоты собственных колебаний определялись по методу Ланцоша.

На рис. 6, а и б приведены карты эквивалентных напряжений, возникающих под действием собственного веса, полученные в ПК APM StructFEM и ANSYS, а на рис. 6, в и г — соответствующие им карты суммарных перемещений.

На рис. 7, а и б приведены карты эквивалентных напряжений, возникающих под действием внутреннего давления, полученные в ПК APM StructFEM и ANSYS, а на рис. 7, в и г — соответствующие им карты суммарных перемещений.

На рис. 8, а и б приведены карты эквивалентных напряжений, возникающих под действием сейсмической нагрузки по оси X, полученные в ПК APM StructFEM и ANSYS, а на рис. 8, в и г — соответствующие им карты суммарных перемещений.

Значения частот собственных колебаний трубопровода, полученные в ПК APM StructFEM и ANSYS, приведены в табл. 3, а параметры напряженно-деформированного состояния — максимальные значения эквивалентных напряжений σ_{max} и суммарных перемещений S_{Σ} в трубопроводе, — возникающих под действием собственного веса, внутреннего давления и сейсмической нагрузки по оси X, — в табл. 4.

На рис. 9 показаны первые четыре формы собственных частот трубопровода, полученные в ПК APM StructFEM.

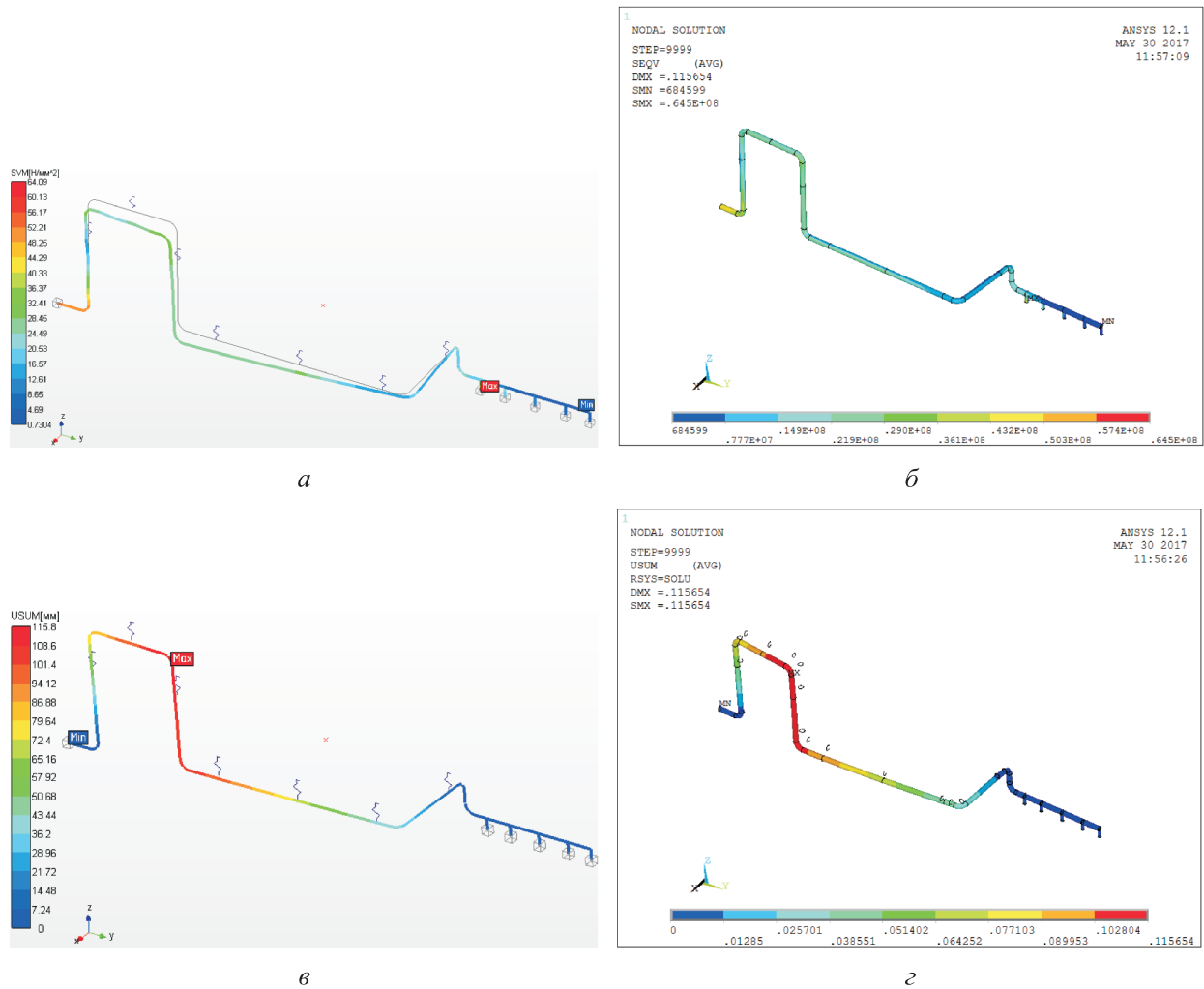


Рис. 8. Карты эквивалентных напряжений (а, б) и суммарных перемещений (в, з) в трубопроводе, возникающих под действием сейсмической нагрузки по оси X, полученные в разных ПК: а, в — APM StructFEM; б, з — ANSYS

Таблица 3

Значения частот собственных колебаний трубопровода

Номер	Частота собственных колебаний, Гц, полученная в ПК		Погрешность, %
	ANSYS	APM StructFEM	
1	1,266	1,267	0,07
2	1,781	1,783	0,11
3	2,313	2,314	0,06
4	3,880	3,879	0,02
5	6,171	6,170	0,02
6	6,926	6,930	0,05
7	10,551	10,550	0,05
8	15,651	15,630	0,13
9	21,086	21,060	0,12
10	22,955	22,920	0,15
11	24,272	24,220	0,32
12	29,180	29,130	0,17

Окончание табл. 3

Номер	Частота собственных колебаний, Гц, полученная в ПК		Погрешность, %
	ANSYS	APM StructFEM	
13	29,787	29,720	0,18
14	33,203	33,090	0,21
15	39,558	39,490	0,21
16	41,946	41,890	0,12

Таблица 4

Максимальные значения эквивалентных напряжений и суммарных перемещений в трубопроводе, возникающих под действием различных нагрузок

Параметр	Значение, полученное в ПК		Погрешность, %
	ANSYS	APM StructFEM	
<i>При воздействии собственного веса</i>			
σ_{max} , МПа	3,740	3,753	0,340
S_{Σ} , мм	0,382	0,375	1,800
<i>При воздействии внутреннего давления</i>			
σ_{max} , МПа	51,300	51,380	0,150
S_{Σ} , мм	1,497	1,494	2,000
<i>При воздействии сейсмической нагрузки по оси X</i>			
σ_{max} , МПа	64,500	64,160	0,540
S_{Σ} , мм	115,650	115,700	0,004

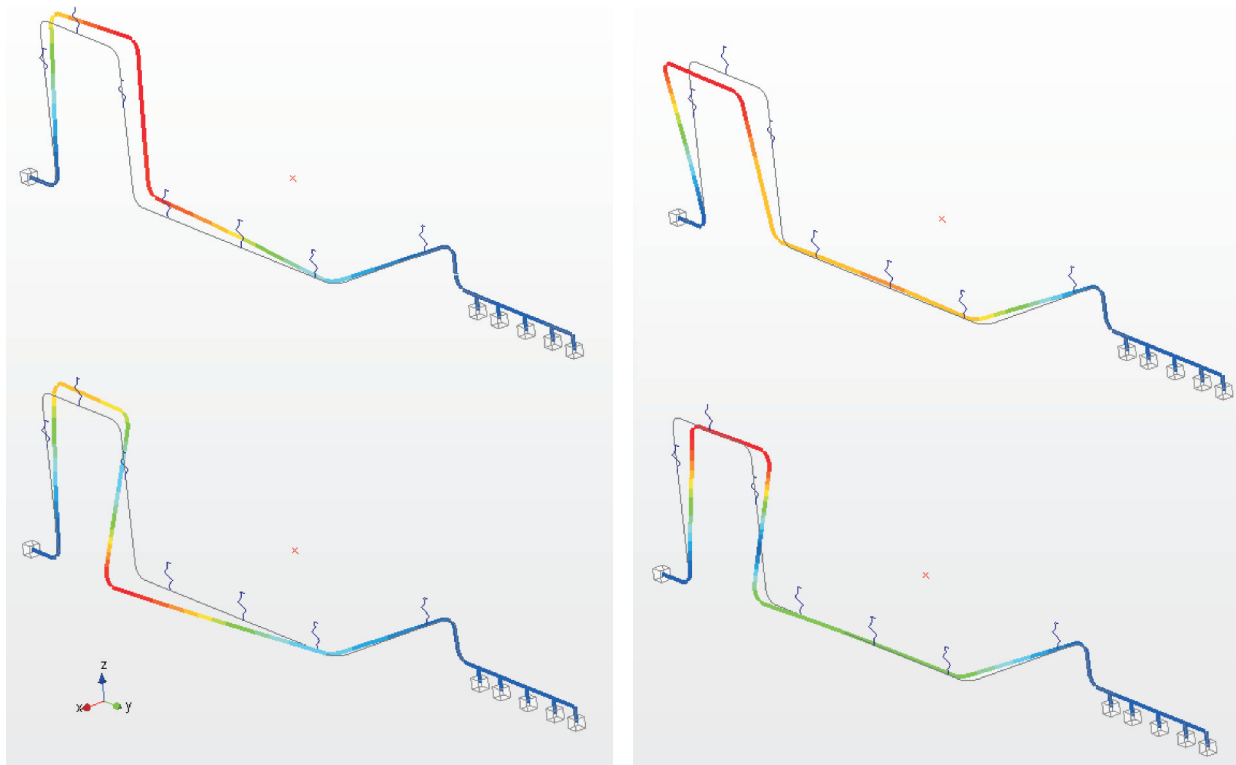


Рис. 9. Первые четыре формы собственных колебаний трубопровода, полученные в ПК APM StructFEM

Выводы

1. Показано, что по точности, получаемых решений отечественный ПК инженерного анализа APM StructFEM не уступает американской системе ANSYS.

2. Расхождение результатов расчетов, выполненных в ПК ANSYS и APM StructFEM, по максимальным суммарным перемещениям в трубопроводе составило 2,0 %, а по максимальным эквивалентным напряжениям — 0,54 %.

3. Оценка сейсмостойкости включала в себя расчет частот и форм собственных колебаний трубопровода и анализ параметров напряженно-деформированного состояния его конструктивных элементов. Так как каждый из рассматриваемых параметров получал сравнительную оценку точности, можно утверждать, что точность решений оказалась достаточной для всех параметров. Следовательно, ПК APM StructFEM можно считать надежным инструментом анализа статики и динамики трубопроводных систем.

Литература

- [1] Bathe K.-J. *Finite element procedures*. Englewood, New Jersey, Prentice Hall, 1996. 1043 p.
- [2] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. Москва, Наука, 1972. 544 с.
- [3] ANSYS (v.12.1). *Help*. URL: <https://www.ansys.com>.
- [4] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The finite element method. The basis*. Butterworth-Heinemann, 2000, vol. 1, 708 p.
- [5] Young W.C., Budynas R.G. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. New York, McGraw-Hill, 2002. 852 p.
- [6] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The finite element method. Solid mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2000, vol. 2, 476 p.
- [7] *Mecaniciens, Societe Francaise des. Guide de validation des progiciels de calcul de structures*. Paris, Afnor Technique, 1990, test no. SSSL08/89. URL: <https://www.worldcat.org/title/guide-de-validation-des-progiciels-de-calcul-de-structures/oclc/301034009>
- [8] Liang-Chuan Peng, Tsen-Loong Peng. *Pipe stress engineering*. ASME Press, 2009. 506 p.
- [9] Tulk J.D. Correlation Between Dynamic Stress and Vibration Velocity in Complex Piping Systems. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, 1989, vol. 180, pp. 19–23.
- [10] Hovgaard W. Stress in three dimensional pipe-bends. *Transactions of ASME*, vol. 57, 1935, pp. 401–416.
- [11] ANSYS *Workbench Verification Manual, Release 15.0*. ANSYS, Inc, 2013.
- [12] Kohnke P. *ANSYS Theory Reference Release 5.7*. SAS IP, 2001. 1126 p.
- [13] Thiagarajan N., Dhananjay R., Shakti Prasad. Stiffness of Pipe Elbow. *International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE'2011) Pattaya Dec, 2011*, pp. 230–234.
- [14] Агапов В.П. *Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций*. Москва, АСВ, 2000. 152 с.
- [15] Clough R., Penzien J. *Dynamics of Structure*. New-York, McGraw-Hill Book Co., 1975. 634 с.

References

- [1] Bathe K.-J. *Finite element procedures*. Englewood, New Jersey, Prentice Hall, 1996. 1043 p.
- [2] Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka publ., 1972. 544 p.
- [3] ANSYS (v.12.1). *Help*. Available at: <https://www.ansys.com>.
- [4] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The finite element method. The basis*. Butterworth-Heinemann, 2000, vol. 1, 708 p.
- [5] Young W.C., Budynas R.G. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. New York, McGraw-Hill, 2002. 852 p.
- [6] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The finite element method. Solid mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2000, vol. 2, 476 p.

- [7] *Mecaniciens, Societe Francaise des. Guide de validation des progiciels de calcul de structures.* Paris, Afnor Technique, 1990, test no. SSSL08/89. Available at: <https://www.worldcat.org/title/guide-de-validation-des-progiciels-de-calcul-de-structures/oclc/301034009>
- [8] Liang-Chuan Peng, Tsen-Loong Peng. *Pipe stress engineering.* ASME Press, 2009. 506 p.
- [9] Tulk J.D. Correlation Between Dynamic Stress and Vibration Velocity in Complex Piping Systems. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, 1989, vol. 180, pp. 19–23.
- [10] Hovgaard W. Stress in three dimensional pipe-bends. *Transactions of ASME*, 1935, vol. 57, pp. 401–416.
- [11] *ANSYS Workbench Verification Manual, Release 15.0.* ANSYS, Inc, 2013.
- [12] Kohnke P. *ANSYS Theory Reference Release 5.7.* SAS IP, 2001. 1126 p.
- [13] Thiagarajan N., Dhananjay R., Shakti Prasad. Stiffness of Pipe Elbow. *International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE'2011) Pattaya Dec*, 2011, pp. 230–234.
- [14] Agapov V.P. *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti prostranstvennykh tonkostennykh podkreplennykh konstruksiy* [The finite element method in the statics, dynamics and stability of spatial thin-walled reinforced structures]. Moscow, ASV publ., 2000. 152 p.
- [15] Clough R., Penzien J. *Dynamics of Structure.* New-York, McGraw-Hill Book Co., 1975. 634 p.

Статья поступила в редакцию 25.11.2019

Информация об авторах

ШЕЛОФАСТ Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана; генеральный директор ООО НТЦ «АПМ» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: vvshelofast@apm.ru).

ШЕЛОФАСТ Вадим Владимирович — технический директор ООО НТЦ «АПМ» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: chevrole59@mail.ru).

ЗАМРИЙ Александр Анатольевич — кандидат технических наук, руководитель отдела обучения ООО НТЦ «АПМ» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: zamriy@apm.ru).

Information about the authors

SHELOFAST Vladimir Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University; General Director, OOO APM Research Center (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: chevrole59@mail.ru).

SHELOFAST Vadim Vladimirovich — Chief Technical Officer, OOO APM Research Center (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: chevrole59@mail.ru).

ZAMRIY Aleksandr Anatolyevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Training Department, OOO APM Center (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: zamriy@apm.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шелюфаст В.В., Шелюфаст В.В., Замрий А.А. Валидация решений динамического анализа трубопроводных систем сравнением результатов вычислений, полученных в отечественном комплексе APM StructFEM и в системе ANSYS, применительно к задачам сейсмостойкости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 34–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-34-43

Please cite this article in English as:

Shelofast V.V., Shelofast V.V., Zamriy A.A. Validation of Solutions for Dynamic Analysis of Pipeline Systems by Comparing the Results of Calculations Obtained in the Russian CAE system APM StructFEM and in ANSYS as Applied to Seismic Resistance Problems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 4, pp. 34–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-34-43