



УДК 621: 531: 539.4

ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА К СЕЙСМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В.В.Скляр, кандидат технических наук, ученый секретарь ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Рассматривается подход к исследованию прочностных характеристик оборудования методом конечных элементов с использованием программного пакета при оценке устойчивости промышленного объекта к сейсмическим воздействиям.

There is considered the investigation approach of strength properties of the equipment by means of the method of finite elements using software when assessing the resistance of industrial project to seismic impacts.

Введение

При работе промышленных объектов решаются задачи, связанные с исследованием прочностных характеристик оборудования, которые определяют его способность сопротивляться воздействию внешних сил и не разрушаться. Инженерный расчет и анализ нагрузок на оборудование позволяет оценить его прочностные характеристики и сделать вывод об устойчивости оборудования к сейсмическим воздействиям. Экстремальные условия эксплуатации оборудования на промышленных объектах, крупные габаритные размеры, многокомпонентность формы оборудования затрудняют проведение лабораторных исследований при определении максимальных нагрузок. Одним из путей решения этой инженерной проблемы является компьютерное моделирование и численный расчет модели.

Постановка задачи

Мощным инструментом при компьютерном моделировании и численном расчете объектов сложной геометрической конфигурации и многокомпонентной физической структуры является метод конечных элементов (МКЭ). Суть метода заключается в представлении объекта с бесконечным числом степеней свободы, совокупностью отдельных конечных элементов, связанных между собой в узловых точках с конечным числом степеней свободы. При известных физико-механических характери-

стиках объекта определяется взаимосвязь между неизвестными узловыми усилиями, перемещениями и воздействиями. В результате расчет сводится к решению системы с конечным числом линейных алгебраических уравнений [1, 2].

При проектировании объекта расчет на прочность проводят в два этапа [3]:

- расчет по выбору основных размеров;
- поверочный расчет.

При выполнении расчета по выбору основных размеров учитывают действующее на оборудование и трубопроводы давление (наружное и внутреннее). В основу формул, используемых при расчете по выбору основных размеров, положен метод предельных нагрузок, соответствующий следующим предельным состояниям: вязкое разрушение, охват пластической деформацией всего сечения оборудования или трубопровода, потеря устойчивости и достижение предельной деформации.

После расчета по выбору основных размеров проводят поверочный расчет, включающий следующие этапы:

- расчет на статическую прочность;
- расчет на устойчивость;
- расчеты на циклическую и длительную циклическую прочности;
- расчет на сопротивление хрупкому разрушению;
- расчет на длительную статическую прочность;
- расчет на прогрессирующее формоизменение;
- расчет на сейсмические воздействия;
- расчет на вибропрочность.

Поверочный расчет основывается на оценке прочности по допускаемым напряжениям, деформациям и коэффициентам интенсивности напряжения. При поверочном расчете учитываются все действующие нагрузки (включая температурные воздействия) и рассматриваются все режимы эксплуатации.

В данной статье, в качестве примера, представлены расчеты только на статическую прочность и на сейсмические воздействия.

Метод решения

Решения в аналитической форме известными классическими методами приводятся, как прави-

ло, для областей классической геометрической формы [4]. Для исследования физико-механических полей объектов произвольной формы применяются системы инженерных пакетов и программные комплексы (ANSYS, MSC.NASTRAN, ABAQUS, LS-DYNA), разработанные на базе МКЭ [1, 2, 5]. Для расчета полей различных физических величин с помощью МКЭ в рассматриваемой области необходимо определить материалы элементов объекта и задать их свойства, прежде всего, модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Для получения численных результатов исследования прочностных характеристик объекта возможно применение программного комплекса ANSYS [5–7]. Это многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин (механике, теплофизике, динамике и электромагнетизме). Разработчик – фирма “ANSYS, Inc.”, США. Программный продукт ANSYS сертифицирован согласно ряду международных стандартов и требований для атомной промышленности.

Решение задачи

В качестве примера рассмотрим расчеты на статическую прочность одного и того же типа оборудования с различными температурами внутренней рабочей среды.

По конструкторской документации строим геометрическую модель оборудования (рис. 1).

При построении сетки конечных элементов на оборудовании применялся объемный элемент

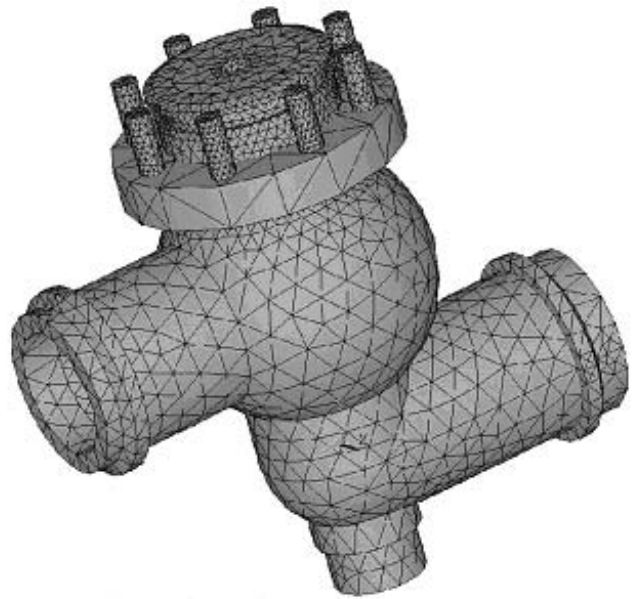


Рис. 1. Общий вид геометрической цифровой 3D-модели оборудования

SOLID95 [8], который использует нерегулярную форму сетки без потери точности и описывает модели с искривленными границами. Элемент определяется 20 узлами, имеющими 3 степени свободы в каждом узле (перемещения в направлении осей X, Y, Z узловой системы координат), и имеет произвольную ориентацию в пространстве. Для корректного разбиения сложной криволинейной поверхности на элементы SOLID95 трансформируется в тетраэдр, пирамиду или призму с сохранением количества

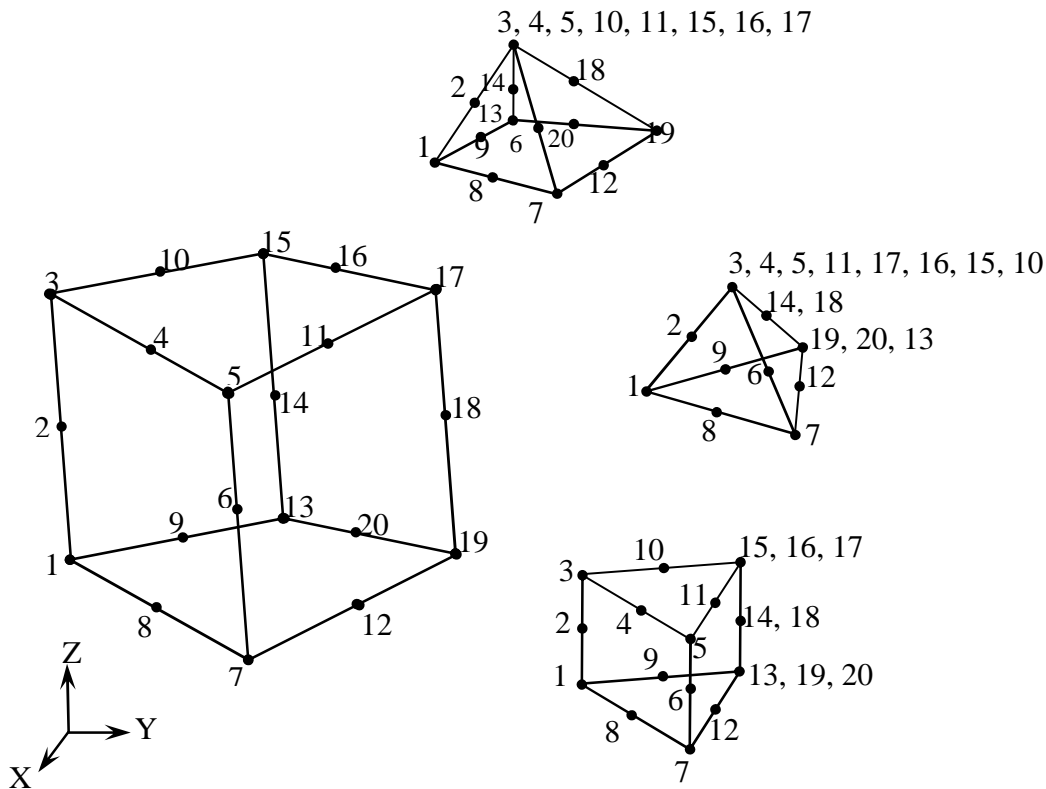


Рис. 2. Геометрия элемента SOLID95

узлов. Моделируемое элементом SOLID95 оборудование разбито на 154105 элементов и описывается 796842 степенями свободы. Геометрия конечного элемента SOLID95 и его разновидности (пирамида, тетраэдр, призма) представлены на рис. 2.

Пользуясь нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, задаем механические свойства материалов [3].

Исследуемые модели изготовлены из стали типа 08X18H10T (аналог X08 CrNiTi 18-9) с механическими характеристиками при различной температуре оборудования, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Температура, °C	55	270
Коэффициент Пуассона, μ	$1,99 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Модуль Юнга E , МПа	0,28	
Предел прочности R_m , МПа	590	467
Предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	266	208
Плотность ρ , кг/м ³	7900	

Согласно ПНАЭ Г 7-002-86 (п. 3.4), номинальное допустимое напряжение для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных внутренним давлением, принимают минимальным из следующих значений:

$$[\sigma] = \min \left(\frac{R_m}{2,6}; \frac{R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_{mt}}{1,5} \right),$$

где R_m – предел прочности; $R_{p0,2}$ – предел текучести; R_{mt} – предел длительной прочности за время t .

Для расчета оборудования на статическую прочность при нормальных условиях эксплуатации (ПНАЭ Г 7-002-86, п. 5.4) можно выделить следующие группы допустимых напряжений:

допустимые мембранные напряжения (от действия давления) $[\sigma]_1 = [\sigma]$;

допустимые приведенные напряжения, определяемые по суммам мембранных и изгибных напряжений (давление плюс вес) $[\sigma]_2 = 1,3 \cdot [\sigma]$.

Для расчета на сейсмостойкость при типе нагружения “нормальные условия эксплуатации плюс максимальное расчетное землетрясение” (НУЭ+МРЗ), согласно ПНАЭ Г 7-002-86, п. 5.11, можно выделить следующую группу допустимых напряжений: допустимые мембранные плюс сейсмические напряжения (давление плюс сейсмика) $[\sigma]_1^{сейсм} = 1,4 \cdot [\sigma]$.

Запишем значения напряжений для рассматриваемого оборудования в табл. 2.

Используя программный комплекс ANSYS, определяем максимальные локальные напряжения ($[\sigma]_{\text{макс. локальное}}$) в оборудовании при одинаковом внутреннем давлении 14 МПа и различных рабочих температурах (55 и 270 °C) (табл. 3).

Согласно [3, 9] условие прочности выполняется, если $[\sigma]_{\text{макс. локальное}} \leq [\sigma]_2$ (табл. 4).

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета допустимых напряжений в корпусе исследуемого оборудования.

Подобным образом, основываясь на [3, 9], определяем $[\sigma]_1^{сейсм}$, учитывая условия эксплуатации и значения статической прочности (табл. 5).

Для расчета прочности при сейсмических воздействиях необходимо определить собственные час-

Таблица 2

Температура, °C	55	270
Номинально допустимое мембранное напряжение $[\sigma] = \min \left(\frac{R_m}{2,6}; \frac{R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_{mt}}{1,5} \right)$, МПа	177	139
Допустимое приведенное напряжение $[\sigma]_2 = 1,3 \cdot [\sigma]$, МПа	230	181
$[\sigma]_1^{сейсм} = 1,4 \cdot [\sigma]$, МПа	248	194

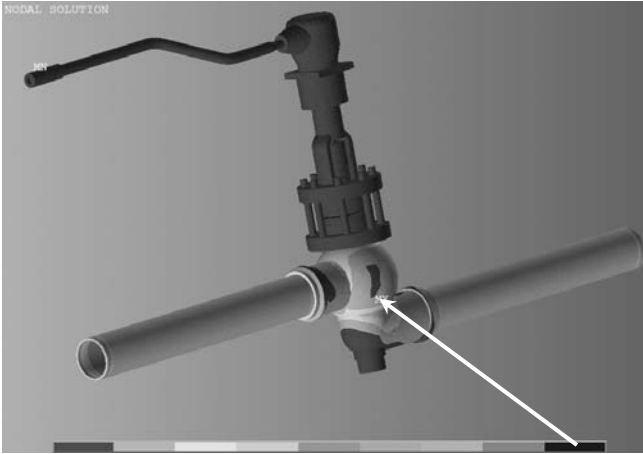
Таблица 3

Внутреннее давление, МПа	14	
Температура, °C	55	270
Максимальное локальное напряжение $[\sigma]_{\text{макс. локальное}}$, МПа	204	236

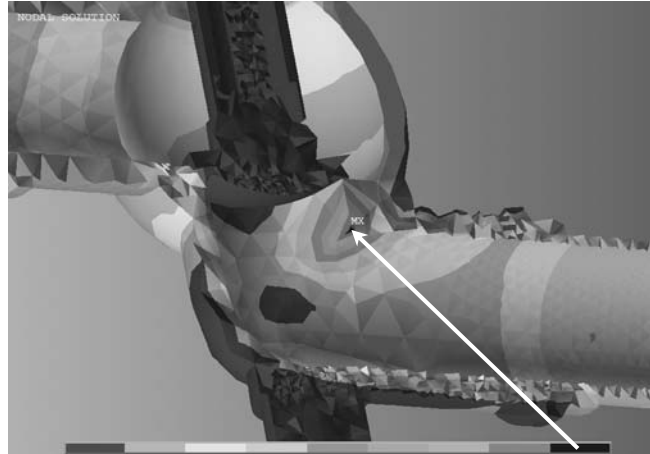
Таблица 4

Допустимое напряжение $[\sigma]_2$, МПа	230	181
$[\sigma]_{\text{макс. локальное}}$, МПа	204	236
Условие статической прочности	Выполняется	Не выполняется

Температура 55 °С



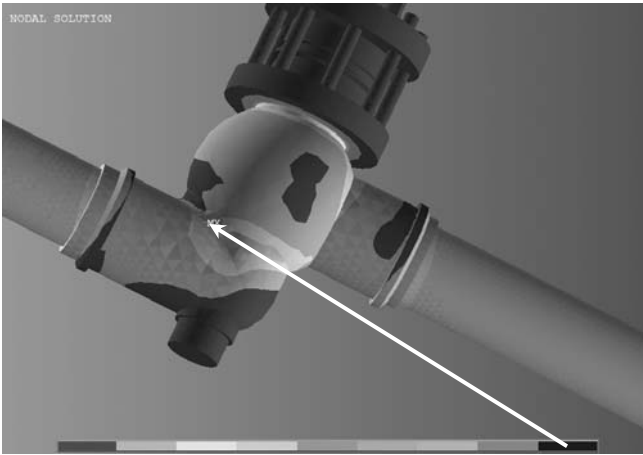
$[\sigma]_{\text{макс.локальное}} = 204 \text{ МПа}$



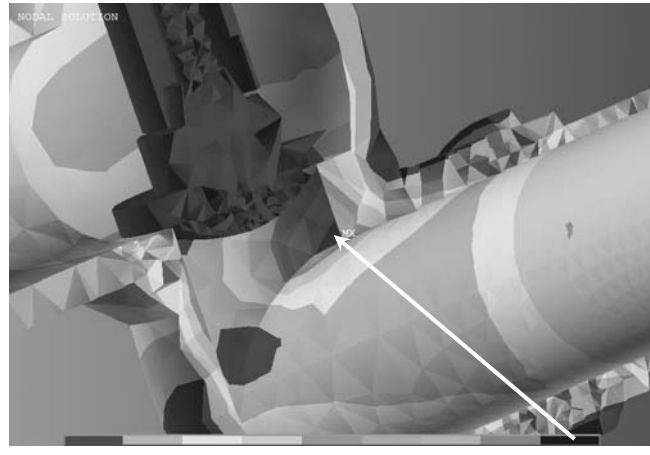
(зона максимального локального напряжения)
 $[\sigma]_{\text{макс.локальное}} = 204 \text{ МПа}$

Рис. 2. Оборудование с выполняющимся условием статической прочности

Температура 270 °С



$[\sigma]_{\text{макс.локальное}} = 236 \text{ МПа}$



(зона максимального локального напряжения)
 $[\sigma]_{\text{макс.локальное}} = 236 \text{ МПа}$

Рис. 3. Оборудование с превышением допустимых напряжений

Таблица 5

Номинально допустимое мембранное напряжение $[\sigma] = \min\left(\frac{R_m}{2,6}; \frac{R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_{m1}}{1,5}\right), \text{ МПа}$	177	139
Допустимое приведенное напряжение $[\sigma]_1^{\text{сейсм}} = 1,4 \cdot [\sigma], \text{ МПа}$	248	194

тоты, формы (моды) собственных колебаний, то есть решить задачу модального анализа. Кроме того, необходимо задать реальное сейсмическое воздействие, которое характеризуется спектром ответа в точке крепления оборудования (поэтажным спектром ответа). Под спектром ответа понимают совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейно-упругой системы с

одной степенью свободы (осциллятора), при заданном акселерограммой воздействии, определённых в зависимости от собственной частоты и параметра демпфирования осциллятора [10, 11]. Для рассматриваемой пары оборудования (различная высота расположения и различная температура эксплуатации) используем следующий спектр ответа в диапазоне частот от 0,5 до 30,0 Гц, полученный путем

Таблица 6

$f, \text{Гц}$	0,5	3	3,5	4	6	8	12	13	15	17	18	20	22	23	28	30
$a^{6,75}, \text{м/с}^2$	2,60	4,33	4,90	8,73	8,73	3,69	2,66	2,44	2,07	1,73	1,56	1,49	1,33	1,29	0,93	0,93
$a^{12,10}, \text{м/с}^2$	2,60	4,75	7,06	9,69	9,69	4,33	2,79	2,70	2,55	2,69	2,67	2,67	1,93	1,93	1,89	1,89

Таблица 7

Высота расположения оборудования, м	6,75	12,10
Напряжение при сейсмическом воздействии по оси X, МПа	1,3	8,4
Напряжение при сейсмическом воздействии по оси Y, МПа	4,0	2,6
Напряжение при сейсмическом воздействии по оси Z, МПа	1,7	4,4

решения задачи модального анализа с применением ANSYS (табл. 6).

Спектры ответа для оборудования, расположенного на высотах 6,75 и 12,10 м, представлены в табл. 6.

Программным комплексом ANSYS определены напряжения при сейсмическом воздействии МРЗ, равном 6 баллам, по горизонтальным осям X, Y и вертикальной оси Z. Значение ускорений в вертикальном направлении Z принимается с коэффициентом 0,7 от значения ускорений в горизонтальном направлении. Расчетные значения напряжений по осям X, Y, Z для различных высот установки оборудования представлены в табл. 7.

Согласно [10], суммарный (расчетный) сейсмический отклик оборудования на приложенное сейсмическое воздействие определяется как

$$[\sigma]_{\text{отклика}} = \sqrt{[\sigma]_X^2 + [\sigma]_Y^2 + [\sigma]_Z^2}. \quad (1)$$

Суммарное максимальное напряжение на оборудовании определяется как сумма

$$[\sigma]_{\text{суммарное.макс}} = [\sigma]_{\text{макс.локальное}} + [\sigma]_{\text{отклика}}. \quad (2)$$

Результат определения сейсмической прочности представлен в табл. 8.

Таким образом, для оборудования, расположенного на отметке 6,75 м, условия статической и сейсмической прочности выполняются. Для оборудования, расположенного на высоте 12,1 м, условия

Таблица 8

Высота расположения оборудования, м	6,75	12,10
$[\sigma]_{\text{сейсм}}, \text{МПа}$	248,0	194,0
$[\sigma]_{\text{макс.локальное}}, \text{МПа}$	204,0	236,0
$[\sigma]_{\text{отклика}}, \text{МПа}$	4,5	9,8
$[\sigma]_{\text{суммарное.макс}}, \text{МПа}$	208,5	245,8
Условие прочности: $[\sigma]_{\text{суммарное.макс}} \leq [\sigma]_{\text{сейсм}}, \text{МПа}$	208,5 < 248,0 Выполняется	245,8 > 194,0 Не выполняется

статической и сейсмической прочности не выполняются. Превышения допустимых сейсмических напряжений в корпусе оборудования представлены на рис. 4.

При невыполнении условий статической прочности необходимо провести замену оборудования на более устойчивое к нагрузкам. В случае невыполнения сейсмической прочности необходимо провести антисейсмические мероприятия по дополнительному закреплению оборудования по месту установки.

Заключение

Расчет эксплуатационных характеристик оборудования является неотъемлемой частью расчетно-экспериментального метода, разработанного ННЦ "Институт метрологии" при продлении про-

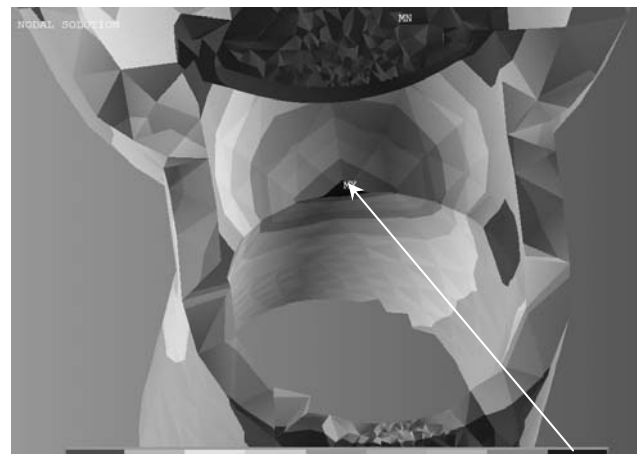
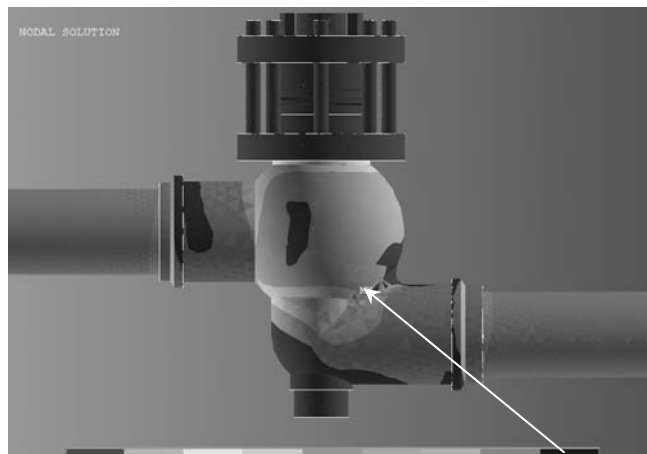


Рис. 4. Отображение превышений сейсмических напряжений в оборудовании

ектных сроков эксплуатации оборудования. Подобный алгоритм применим для определения всех эксплуатационных и прочностных характеристик.

Метод конечных элементов позволяет проводить детальный расчет напряжений и деформаций в оборудовании при статическом и динамическом воздействиях. Использование МКЭ позволяет рассчитать объекты оборудования сложной геометрической формы и сделать выводы и рекомендации о его дальнейшей эксплуатации, замене или укреплении.

Практика использования прочностных расчетов экономически оправдана для крупногабаритного оборудования в зоне с радиационным фоном, которое не предполагает присутствия обслуживающего персонала или проведения динамических испытаний по месту эксплуатации при оценке устойчивости промышленного объекта к сейсмическим воздействиям.

Список литературы

1. *Зенкевич О.С.* Метод конечных элементов в технике / О.С. Зенкевич – М.: Мир, 1975. – 349 с.
2. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища школа; Лейпциг: Фаб Фахбухферлаг, 1982. – 420 с.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
4. *Тихонов А.Н.* Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. – 798 с.
5. *Каплун А.Б.* ANSYS в руках инженера / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС Пресс, 2003. – 272 с.
6. *Басов К.А.* ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
7. *Чигарев А.В.* ANSYS для инженера / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
8. *Басов К.А.* ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 224 с.
9. *Писаренко Г.С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев: Дельта, 2008. – 816 с.
10. *Бирбраер А.Н.* Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб.: Наука, 1998. – С. 78.
11. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости: ГОСТ 30546.1-98. – [Дата введения 2000-07-01]. – К.: Госстандарт Украины, 2000. – 47 с. – (Межгосударственный стандарт).