

УДК 621.039

РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯОП-УСТАНОВКИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

А.В. Карелин
(ФГУП ЦНИИмаш)

А.Ю. Рузаков, И.Н. Хиблин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлены результаты расчёта конструкции опорной части активной зоны ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов в двух вариантах исполнения: стандартной конструкции (взятой за основу) и усиленной конструкции. В результате прочностного расчёта и расчёта собственных частот конструкции показано, что стандартная конструкция полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым АЭС при землетрясении 7 баллов при уровне установки 0 м.
Ключевые слова: ЯОП-установка, расчёт на прочность, землетрясение, собственные частоты, конечно-элементная модель, коэффициент запаса.

На этапе проектирования и расчёта ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов одними из основных требований являются размещение на территории РФ и привязка к конкретным объектам, требующим энергообеспечение. В связи с тем, что около крупных городов строительство таких установок проблематично и нецелесообразно, следует рассматривать:

- нефте- и угледобывающие районы;
- газоперекачивающие станции;
- районы с невысокой плотностью населения, где имеется градообразующее предприятие;
- районы расположения станций слежения или военные объекты.

При расчёте ЯОП-установки следует руководствоваться требованиями, предъявляемыми к АЭС, так как данная установка служит хранилищем для ядерных отходов АЭС.

Территория РФ характеризуется в целом умеренной сейсмичностью. Исключения составляют регионы Северного Кавказа, юг Сибири и Дальний Восток (рис. 1), где интенсивность сейсмических сотрясений достигает 8 – 9 и 9 – 10 баллов по шкале MSK-64. Определённую угрозу представляют 6 – 7-балльные зоны в европейской части страны.

В сейсмическом отношении территория России принадлежит Северной Евразии, сейсмичность которой обусловлена интенсивным геодинамическим взаимодействием нескольких литосферных плит – Евроазиатской, Африканской, Аравийской, Индо-Австралийской, Китайской, Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотоморской.

В настоящей работе рассматривается два варианта опорной части конструкции активной зоны

ЯОП-установки для определения мест расположения на территории РФ, в частности, в сейсмически опасных регионах.

В настоящее время на территории РФ в части сейсмостойкости действуют несколько нормативных документов, регламентирующих процедуру подтверждения сейсмостойкости оборудования. В РФ наиболее применяемым стандартом при подтверждении сейсмостойкости электротехнических изделий является ГОСТ 17516.1-90. Этот стандарт охватывает широкий спектр изделий различного назначения, в нём содержатся общие технические требования по стойкости к воздействию внешних механических факторов. Для АЭС, введённых в эксплуатацию, используется именно этот стандарт [1], который содержит информацию о требуемых спектрах ответа и режимах испытаний для всех строительных площадок и конструкций зданий АЭС в обобщённом виде.

Поскольку информация о требуемых спектрах ответа обобщается для всех строительных площадок и конструкций зданий АЭС, то для выбора соответствующего режима испытаний достаточно знать интенсивность землетрясения в баллах и высотную отметку установки оборудования.

Обобщённые уровни испытаний на сейсмостойкость (рис. 2) для систем управления технологическими процессами атомных станций существенно (в 2 раза) увеличены в низкочастотной области в сравнении с требованиями, применяемыми в промышленности.

В зависимости от высоты установки оборудования над уровнем нулевой отметки и сейсмичности площадки строительства (по шкале MSK-64)

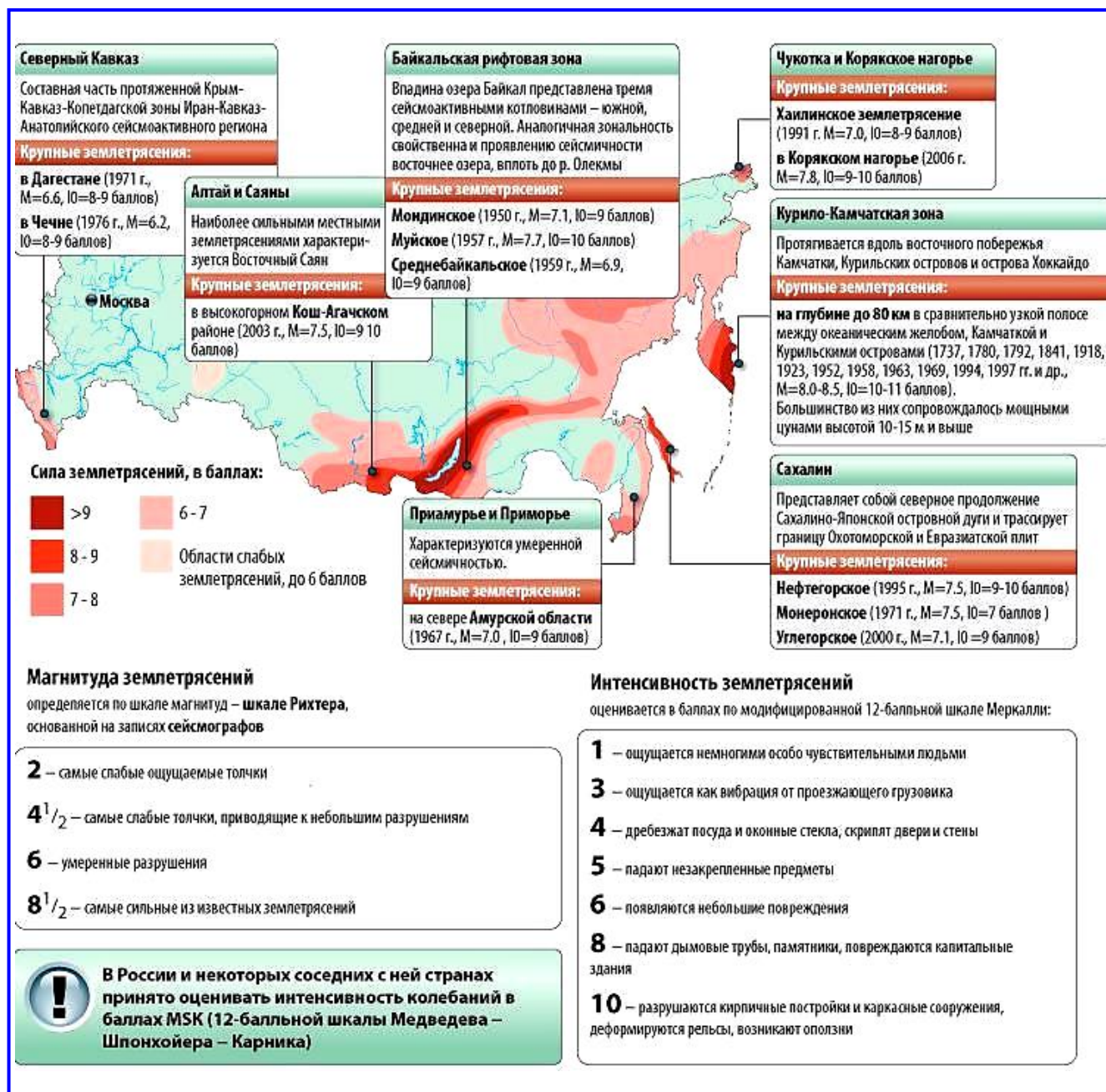


Рис. 1. Сейсмически активные зоны на территории РФ

базовый режим испытаний пересчитывается в соответствии с таблицей.

Современной тенденцией является переход от обобщенных способов задания сейсмической информации к индивидуальным, заданным отдельно для каждого места установки оборудования. Сейсмические воздействия задаются в виде требуемых спектров ответа для каждой отметки установки оборудования. Для задания требований используется конечно-элементная модель здания АЭС, с помощью которой производится расчёт спектров реакций для каждого этажа станции, по

которым в дальнейшем формируются режимы испытаний. Такой подход позволяет с максимальной точностью оценить сейсмическую нагрузку, действующую на оборудование, и не подвергать оборудование избыточным нагрузкам при виброиспытаниях [2].

Более современным стандартом в части сейсмической безопасности АЭС являются «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01». Этот стандарт применяется для вновь строящихся блоков АЭС и подготовлен с учётом современных подходов к обеспечению

сейсмостойкости АЭС, индивидуальных строительных особенностей каждой строительной площадки АЭС (использование поэтажных спектров ответа), в нём вводится понятие категорий сейсмостойкости и др. Стандарт обязателен к использованию на вновь строящихся АЭС, для действующих АЭС решение о его использовании принимается в каждом конкретном случае.

Стандарт вводит ряд важных положений, касающихся проектирования, классификации оборудования, подтверждения сейсмостойкости. В стандарте вводится понятие категории сейсмостойкости оборудования.

Введение в действие стандарта НП-031-01 приближает отечественные нормы проектирования АЭС к международным стандартам в области сейсмостойкости, которые используют индивидуальный подход в задании сейсмической информации.

Расчётные нагрузки

В соответствии с ГОСТ 17516.1-90 расчётные нагрузки определялись следующим образом:

1. Расчёт на прочность проводится при одновременном действии нагрузок в вертикальном и одном из горизонтальных направлений. Соответственно рассматриваются два случая: $X + Z$, $Y + Z$.

2. Вертикальную составляющую принимают 0,7 от горизонтальной.

3. В процессе землетрясения на ЯОП-установку действует инерционная нагрузка. Максимальные амплитуды ускорений определяются исходя из низшей резонансной частоты по обобщённому спектру ответа с учётом интенсивности землетрясения и высоты установки оборудования. Землетрясению 7 баллов при уровне установки 0 м по ГОСТ 17516.1-90 соответствует коэффициент 0,25.

Для расчётов ЯОП-установки принято значение параметра демпфирования 5%.

В соответствии с ГОСТ 17516.1-90 (приложение 6, черт. 2 для изделий группы б) максимальное значение спектра ответа на резонансных частотах ЯОП-установки при пятипроцентном демпфировании равно $1g$ (резонансные частоты лежат в диапазоне ниже 3 Гц). Таким образом, с учётом коэффициента пересчёта конструкция активной зоны должна выдерживать перегрузку 0,25g.

Таким образом, при расчёте на прочность приняты следующие расчётные случаи:

$$- a_x = 0,25g; a_z = 0,175g;$$

$$- a_y = 0,25g; a_z = 0,175g,$$

где z – вертикальная ось активной зоны.

Конструкция активной зоны ЯОП-установки представляет собой сферический газгольдер (радиус – 15 м, толщина стенки – 50 мм), опоры сферического

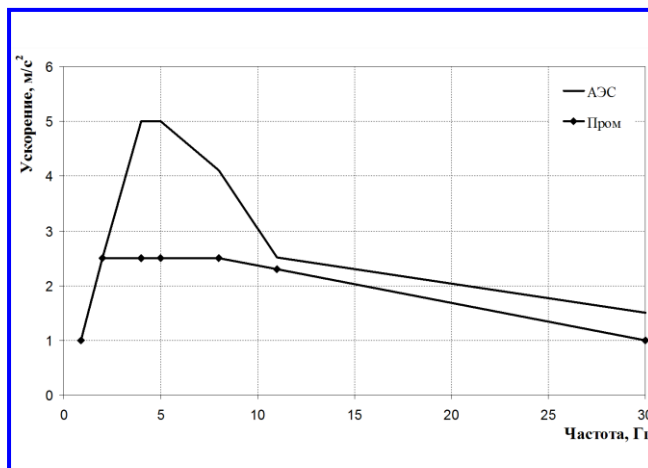


Рис. 2. Режимы испытаний для систем управления технологическими процессами АЭС и изделий общепромышленного назначения

Коэффициенты пересчёта типового режима испытаний

Интенсивность землетрясения, баллы по MSK-64	Коэффициент для уровней установки над нулевой отметкой, м		
	70 – 30	20	10 и ниже
9	2,5	2	1
8	1,25	1	0,5
7	0,6	0,5	0,25
6	0,3	0,25	0,12
5	0,15	0,12	0,06

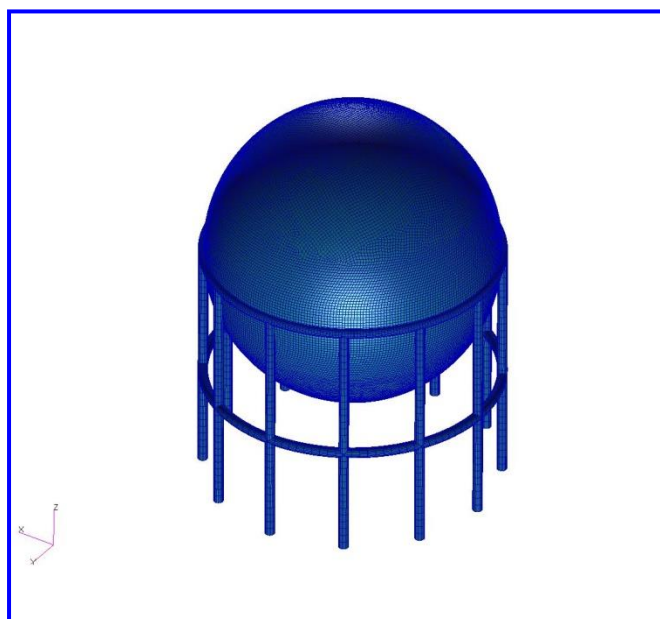


Рис. 3. Конечно-элементная модель активной зоны ЯОП-установки и схема крепления

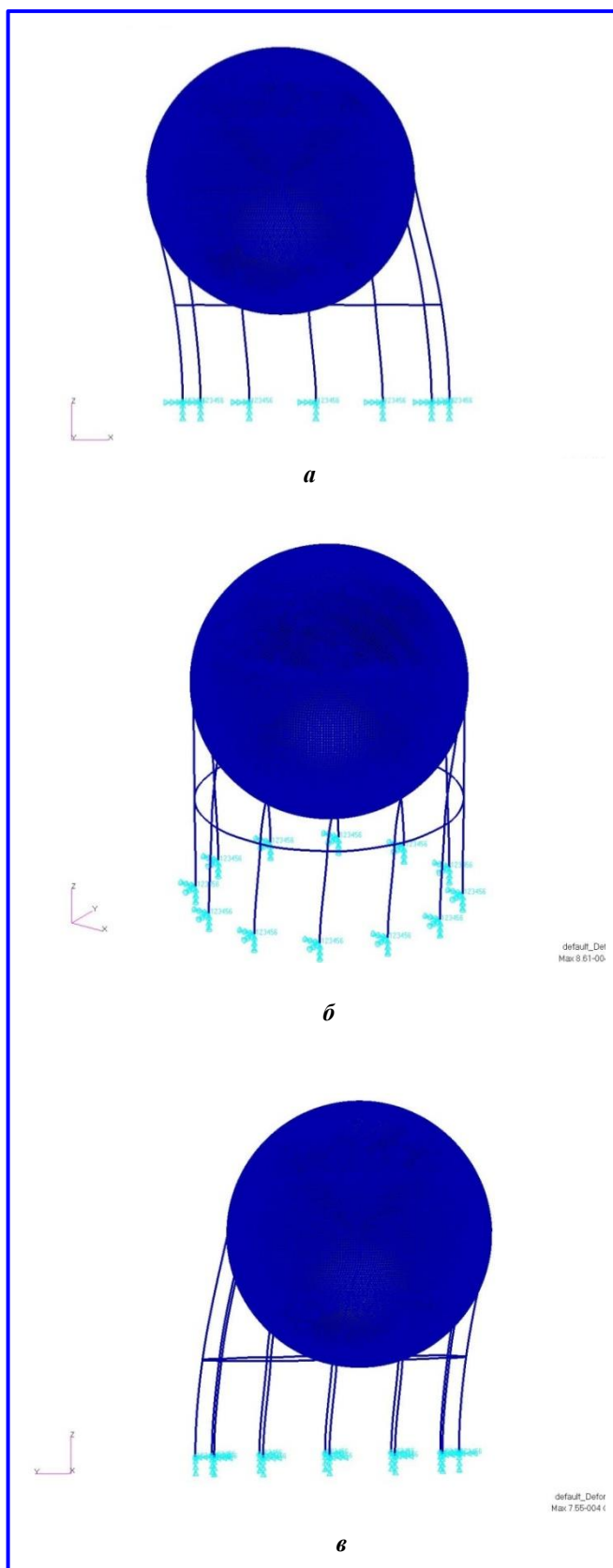


Рис. 4. Формы собственных колебаний стандартной конструкции: *a* – первая форма; *б* – вторая форма; *в* – третья (крутильная) форма

хранилища выполняются в виде стоек-колонн (12 шт.), прикреплённых к шару по экваториальной линии (рис. 3) и подкреплённых растяжками; высота стоек принята 25 м, внутренний диаметр стойки – 1 м, толщина стенки стойки – 10 мм. К оболочке хранилища стойку присоединяют при помощи стальной накладки, отвальцованной по форме шаровой поверхности.

Нагрузка через колонны передаётся на железобетонный кольцевой фундамент с отдельными тумбами под каждую стойку. На тумбы, в месте установки колонн, укладывают опорную стальную плиту, и анкерными болтами закрепляют башмаки стойки.

При расчёте были рассмотрены два варианта конструкции: первый – стандартная конструкция (см. рис. 3); второй – усиленная конструкция крепления газгольдера.

Для каждого варианта была создана конечно-элементная модель, после чего проведены расчёты на прочность и определение собственных частот.

Конечно-элементная модель.

Стандартная конструкция

Для моделирования несущих элементов конструкции (опор) использовались балочные элементы. ЯОП-установка моделировалась оболочечными элементами.

Всего модель содержит 34 844 конечных элементов, 34 542 узлов.

В местах крепления опор к фундаменту введена жёсткая заделка по всем степеням свободы (см. рис. 3).

Расчёт собственных частот конструкции ЯОП-установки. Для оценки жёсткости конструкции ЯОП-установки был выполнен расчёт собственных частот конструкции (рис. 4).

Расчёт собственных частот показал, что низшая собственная частота имеет значение около 2 Гц.

Расчёт на прочность. Так как конструкция является симметричной для ЯОП-установки рассмотрен первый расчётный случай.

На рис. 5 и 6 показаны картины распределения эквивалентных напряжений и места максимальных напряжений в сферической оболочке и несущих опорах по Мизесу.

Максимальные напряжения возникают в месте крепления опор к сферической поверхности ЯОП-установки и составляют 120 МПа.

Коэффициент запаса по пределу прочности – 6,54.

Конечно-элементная модель.

Усиленная конструкция

Созданная конечно-элементная модель, принципиально схожая с первым вариантом, отличается

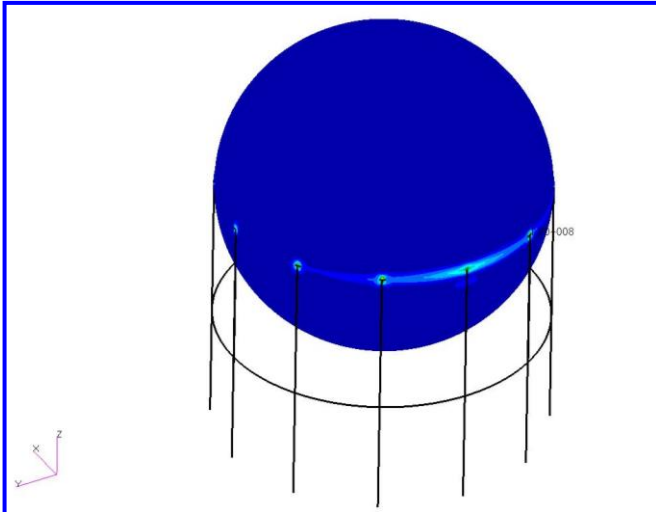


Рис. 5. Напряжения в конструкции активной зоны ЯОП-установки в сферической оболочке

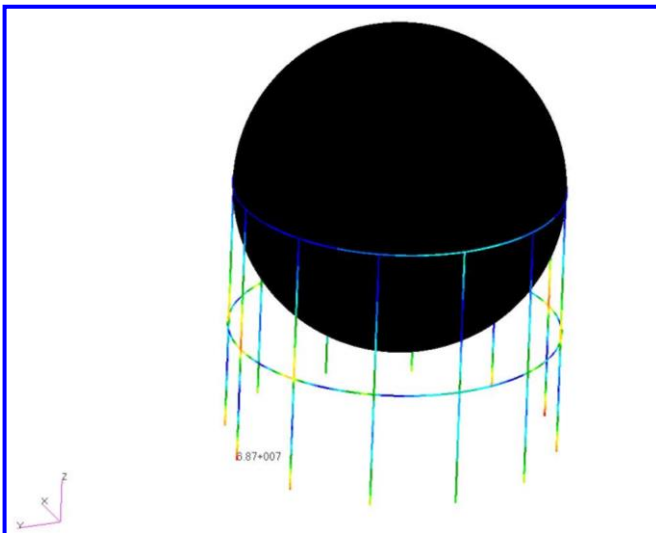


Рис. 6. Напряжения в конструкции активной зоны ЯОП-установки в несущих опорах

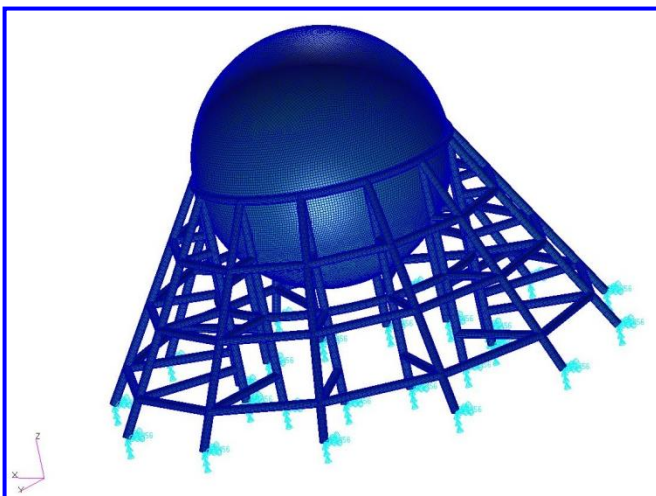


Рис. 7. Конечно-элементная модель активной зоны ЯОП-установки и схема крепления

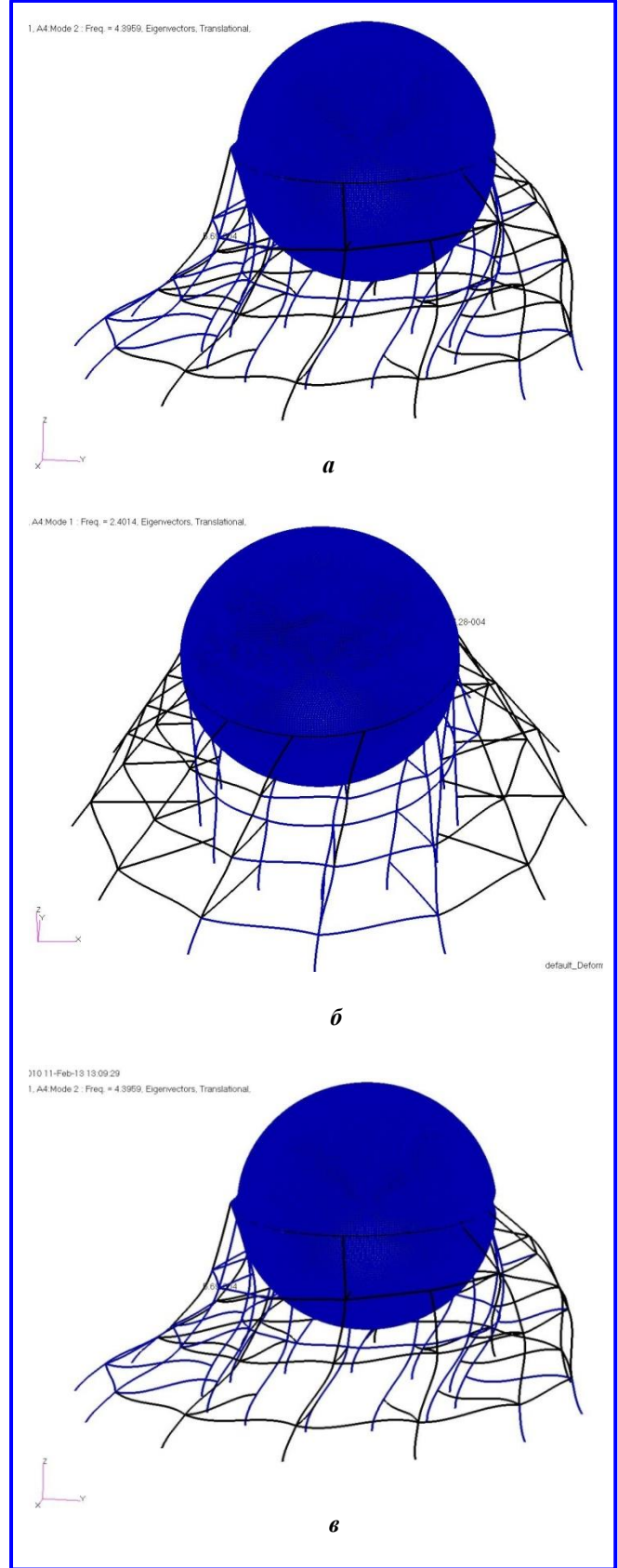


Рис. 8. Формы собственных колебаний усиленной конструкции: а – первая форма; б – вторая форма; в – третья (крутильная) форма

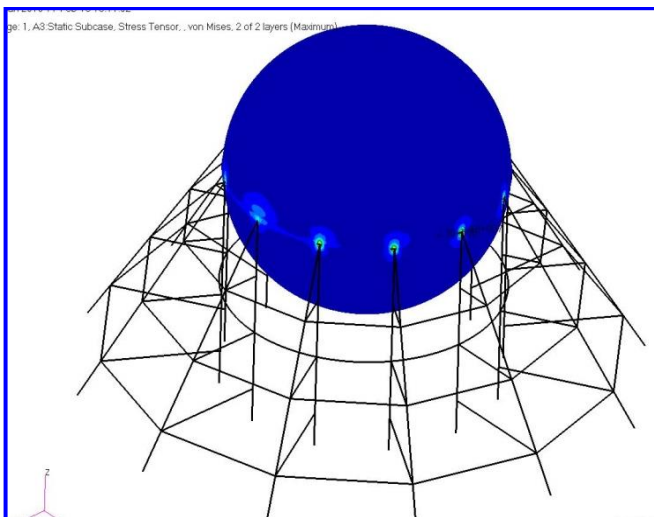


Рис. 9. Напряжения в конструкции активной зоны ЯОП-установки в сферической оболочке

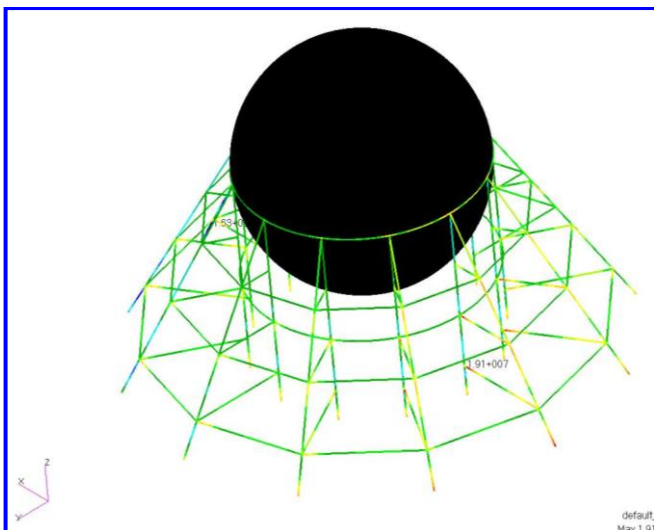


Рис. 10. Напряжения в конструкции активной зоны ЯОП-установки в несущих опорах

геометрическим строением и имеет большую размерность.

Модель состоит из 64 800 конечных элементов, 56 432 узлов.

В местах крепления опор к фундаменту аналогично введена жёсткая заделка по всем степеням

свободы (рис. 7).

Расчёт собственных частот конструкции ЯОП-установки. Для оценки жёсткости конструкции ЯОП-установки был выполнен расчёт собственных частот конструкции (рис. 8).

Расчёт собственных частот показал, что низшая собственная частота имеет значение 4,4 Гц, что позволяет сделать вывод о значительно более высокой жёсткости усиленной конструкции в сравнении с конструкцией стандартной.

Расчёт на прочность. На рис. 9 и 10 показаны картины распределения эквивалентных напряжений и места максимальных напряжений в сферической оболочке и несущих опорах по Мизесу.

Максимальные напряжения возникают в месте опор к сферической поверхности ЯОП-установки и составляют 61 МПа.

Коэффициент запаса по пределу прочности – 12,9.

Выводы

С учётом полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Стандартная конструкция полностью удовлетворяет условиям прочности при сейсмическом воздействии интенсивностью до 7 баллов по шкале MSK-64 при уровне установки 0 м, т. е. конструкция может быть установлена на большей части территории РФ.

2. Усиленная конструкция обладает избыточно большим запасом прочности и жёсткости. Однако в сейсмически опасных регионах она может быть применена в ЯОП-установке по утилизации радиоактивных отходов.

Литература

- ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. – Введ. 1993 – 01 – 01. – М.: Изд. Стандартов, 1990. – 46 с.
- Каверин В. В. Квалификация электрооборудования системы управления и защиты реакторов ВВЭР по критерию сейсмостойкости: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Каверин Владимир Викторович. – М., 2012. – 158 с. – С. 14 – 32.

Поступила в редакцию 16.04.2013

Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела, т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru.

Алексей Юрьевич Рузаков, мл. научн. сотрудник, e-mail: alruzakv@mail.ru.

Иван Николаевич Хиблин, нач. лаборатории, т. (495) 366-14-11, e-mail: nilbix@mail.ru.