

Определение отклика на сейсмическое воздействие в ANSYS

1. Аннотация

В данной работе был определен отклик цилиндрической обечайки (далее – объект) на сейсмическое воздействие различными методами.

2. Описание объекта

Основные характеристики объекта приведены в табл.2.1.

Табл.2.1. Геометрические характеристики объекта

Параметр	Значение, [мм]
Длина	80000
Внутренний диаметр	3000
Толщина стенки	20

Сейсмичность района установки - 7 баллов.

Переход от значений ускорений при землетрясении интенсивностью в 9 баллов к значениям, соответствующих интенсивности в 7 баллов, производится уменьшением ускорений в 4 раза ([2], п.1.7).

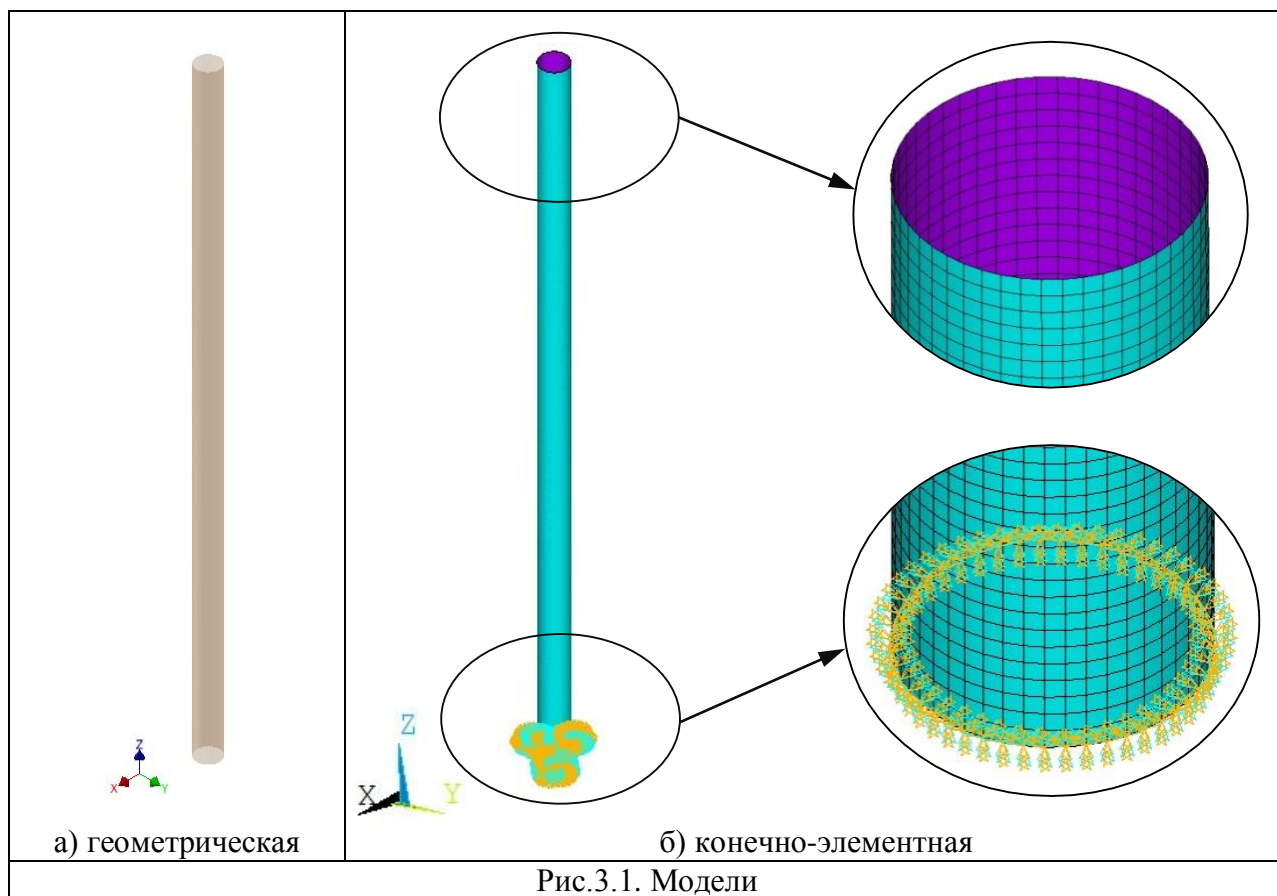
3. Моделирование

В системе трехмерного твердотельного и поверхностного проектирования Autodesk Inventor была создана геометрическая модель объекта.

Переход к континуальной модели был осуществлен импортированием геометрической модели в универсальную программную систему конечно-элементного анализа ANSYS.

Переход от континуальной модели к дискретной расчетной схеме был осуществлен разбиением модели на конечно-элементную сетку с использованием SHELL181.

Геометрическая и конечно-элементная модели объекта представлены на рис.3.1. Граничные условия - ограничение по всем степеням свободы узлов на нижнем торце.



4. Типы анализа

Тип анализа для определения отклика системы на сейсмическое воздействие выбирается в зависимости от вида задаваемой нагрузки.

4.1. Линейно-спектральный анализ

Если нагрузка задается в виде спектра отклика (зависимость максимальных значений ускорений от частоты), то проводится **линейно-спектральный анализ**.

4.1.1. Методы проведения

Проведение линейно-спектрального анализа может быть **однофакторным (SPRS)**, когда точкам крепления задаются одни кривые спектра отклика, а также **многофакторным (MPRS)**, когда точкам крепления задаются разные кривые спектра отклика. Также возможно проведение линейно-спектрального анализа при помощи **метода анализа динамического нагружения (DDAM)** и **метода спектральной плотности мощности (PSD)**.

DDAM используется для оценки ударопрочности корабельного оборудования. Метод состоит в получении отклика системы на спектр, который получен на основе эмпирических уравнений и таблиц расчета на удар, представленных в отчете NRL-1369 военно-морской исследовательской лаборатории.

PSD представляет собой вероятностный подход к нахождению спектрального отклика и известен как анализ случайных колебаний.

4.1.2. Методы комбинирования форм

Для получения отклика системы при проведении методов SPRS, MPRS и DDAM необходимо произвести комбинирование вкладов максимальных перемещений по учтенным формам колебаний. Если эти собственные формы возникают одновременно, то их комбинирование осуществляется в виде алгебраического сложения. Однако данный факт практически невероятен, поэтому решение будет слишком консервативным. Как следствие, комбинирование форм необходимо осуществлять более реалистичными методами, такими как:

- 1) метод квадратного корня из суммы квадратов (SRSS);
- 2) метод полного квадратичного объединения (CQC);
- 3) метод группирования (GRP);
- 4) метод двойной суммы (DSUM);
- 5) метод суммирования военно-морской исследовательской лаборатории (NRLSUM).

Все методы основываются на вычислении квадратного корня из суммы квадратов смежных собственных форм колебаний, умноженных на связывающий коэффициент. Различие между методами заключается лишь в способах определения этого коэффициента.

Рекомендации по использованию методов комбинирования форм колебаний приведены в табл.4.1.2.1.

Табл.4.1.2.1. Рекомендации по использованию методов

Метод	Условия использования	Комментарий
SRSS	Собственные формы достаточно сильно отличаются друг от друга.	Наиболее простой метод.
CQC	Собственные формы близко расположены друг к другу.	Требует больших затрат вычислительных ресурсов.
GRP	Сгруппированные собственные формы близко расположены друг к другу.	Решает близко расположенные собственные формы лучше, чем SRSS, но все еще достаточно грубо.
DSUM	Собственные формы близко расположены друг к другу или две формы имеют равные частоты.	Требует больших затрат вычислительных ресурсов. Требует данных о продолжительности события.
NRLSUM	-	Используется для оценки корабельного оборудования.

При проведении линейно-спектрального анализа при помощи PSD возможно использовать только метод комбинирования спектральной плотности мощности (PSDCOM). С его помощью производится вычисление стандартного отклонения отклика равного одной сигме для перемещений, напряжений и т.д.

4.2. Динамический анализ переходных процессов

Если нагрузка задается в виде акселерограммы (зависимость ускорения от времени), то проводится **динамический анализ переходных процессов** поведения объекта (метод численного интегрирования системы уравнений движения).

4.2.1. Методы проведения

Для проведения динамического анализа переходных процессов существует полный метод (FULL) и метод суперпозиции мод (MSUP).

Полный метод использует полные системы матриц для отыскания динамической реакции системы. Он является наиболее мощным, потому что позволяет учитывать все типы нелинейностей.

В методе суперпозиции мод суммируются коэффициенты форм мод из модального анализа.

Основные преимущества и недостатки перечисленных методов представлены в табл.4.2.1.1

Табл.4.2.1.1. Рекомендации по использованию методов

Метод	Преимущества	Недостатки
FULL	Наиболее простой, т.к. не требует выбора главных степеней свободы или формы мод. Позволяет учитывать все типы нелинейностей. Использует полные матрицы, так что аппроксимация матрицы масс не требуется. Учитывает все типы нагрузок: узловые силы, не нулевые перемещения, нагрузки элементов.	Требует больших затрат вычислительных ресурсов.
MSUP	Работает быстрее и является менее ресурсоемким методом. Метод поддерживает модальное демпфирование (отношение демпфирования в функции от номера моды)	Размер временного шага должен быть постоянным, т.к. автоматический выбор шага не поддерживается. Допускаются нелинейности только контактных условий между узлами или зазоры. Не может использоваться для незакрепленной системы. Метод не поддерживает применение не нулевых перемещений.

5. Модальный анализ

Для определения собственных форм и частот колебаний объекта был проведен модальный анализ объекта, в результате которого было определено 100 первых собственных форм и частот.

Собственные частоты и некоторые собственные формы колебаний представлены на рис.5.1. Собственные частоты являются попарно кратными, что характерно для осесимметричного объекта. При одних парах форм объект ведет себя как стержень, а при других – как оболочка.

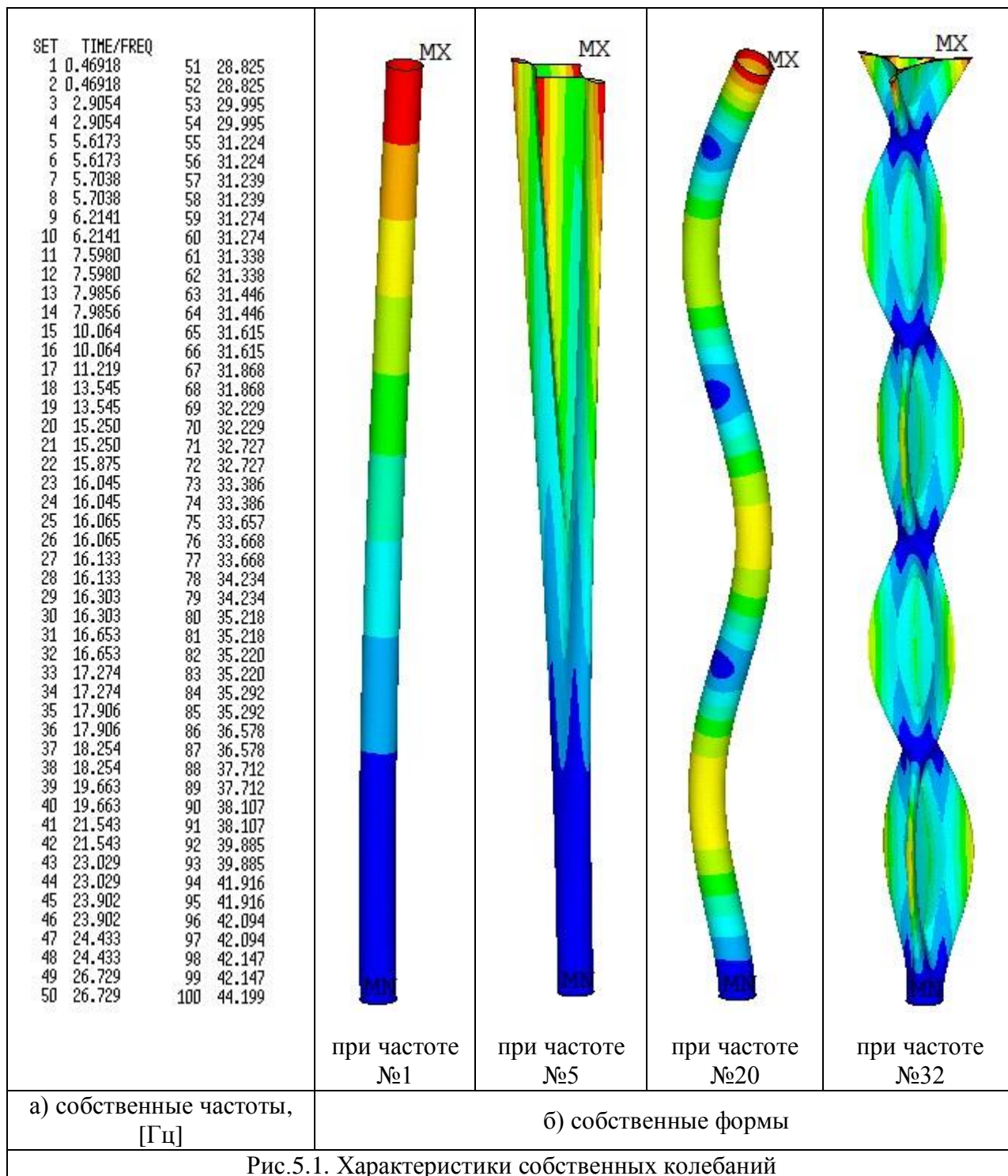
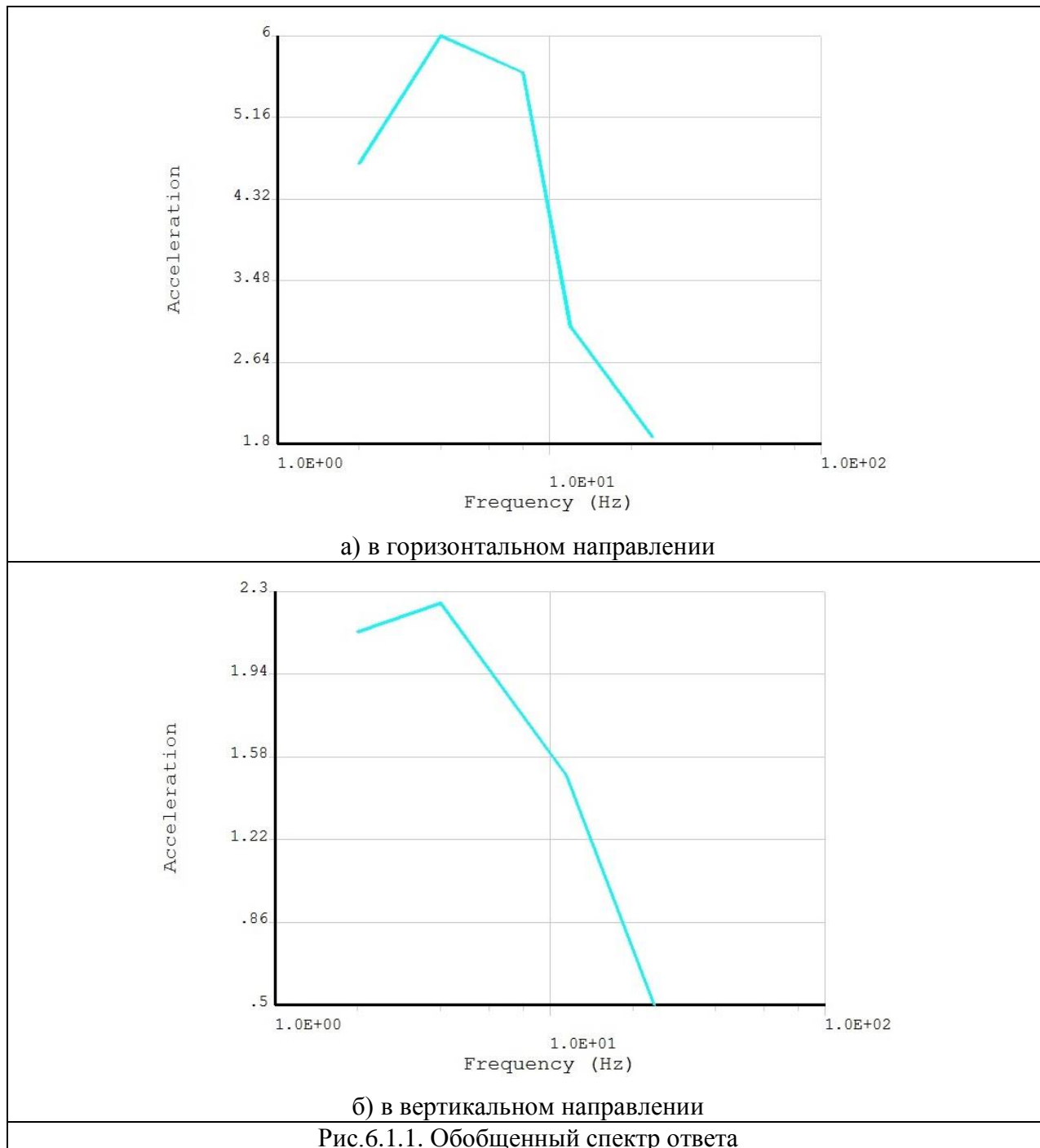


Рис.5.1. Характеристики собственных колебаний

6. Линейно-спектральный анализ

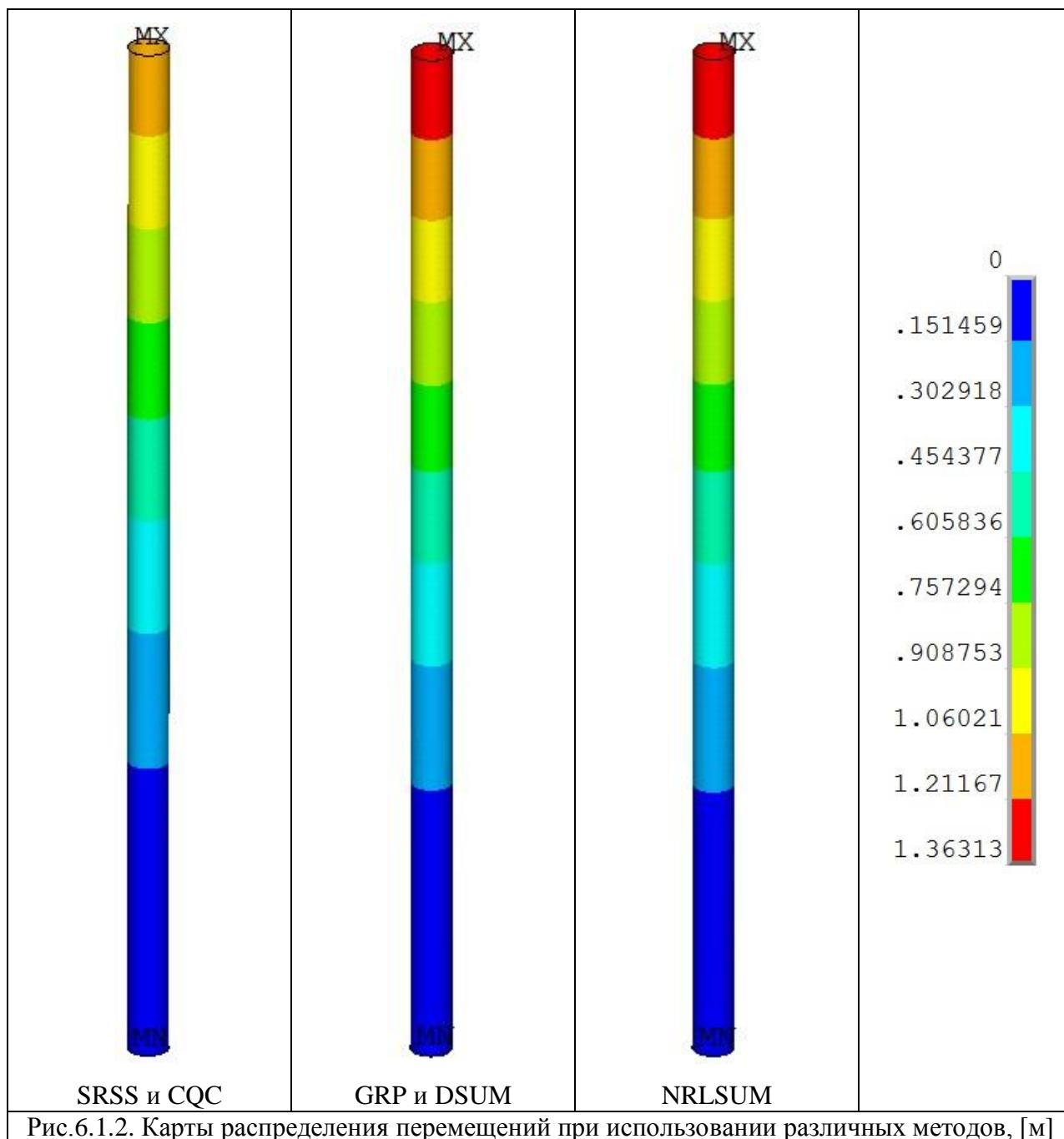
6.1. Спектр ответа согласно ПНАЭ Г-7-002-86

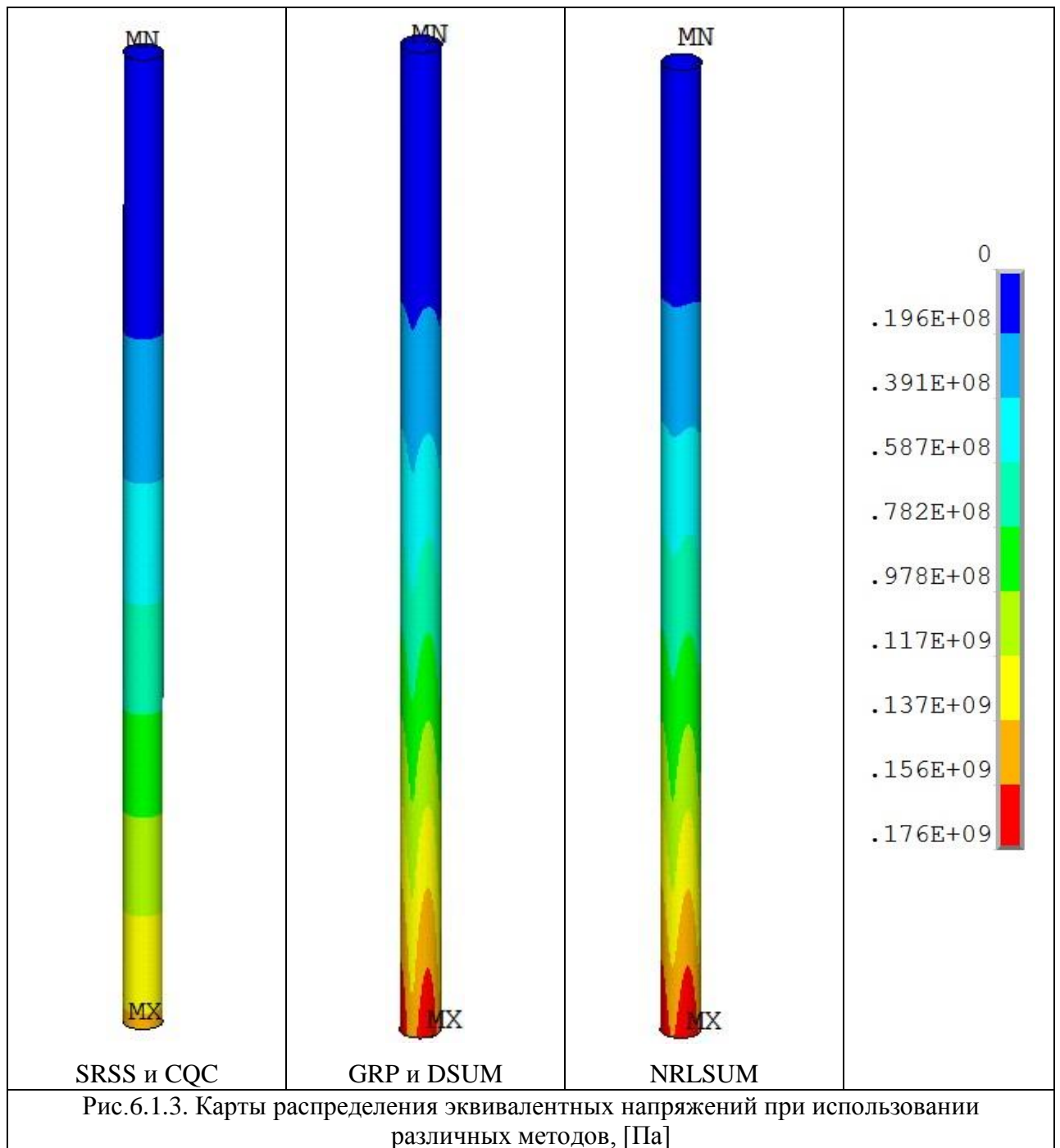
Для рассматриваемого объекта в случае линейно-спектрального анализа в качестве нагрузки был выбран обобщенный спектр ответа по [1], прил.9, рис.П9.1 и рис.П9.2 для отметки оборудования равной 0 м (рис.6.1.1).



Согласно [1], прил.9, п.2.5.3 в расчете было учтено 46 первых собственных форм колебаний, т.к. собственная частота №46, равная 23,902 Гц – максимальное значение, входящее в заданный диапазон частот от 0 до 24 Гц в обобщенном спектре ответа.

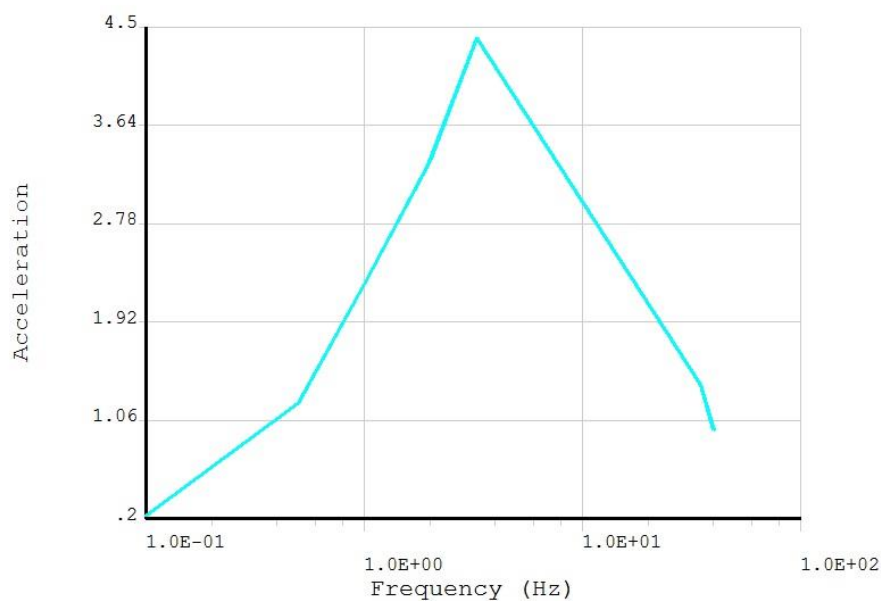
Результаты расчета при проведении однофакторного **линейно-спектрального анализа** с различными методами комбинирования собственных форм колебаний представлены на рис.6.1.2 и рис.6.1.3.



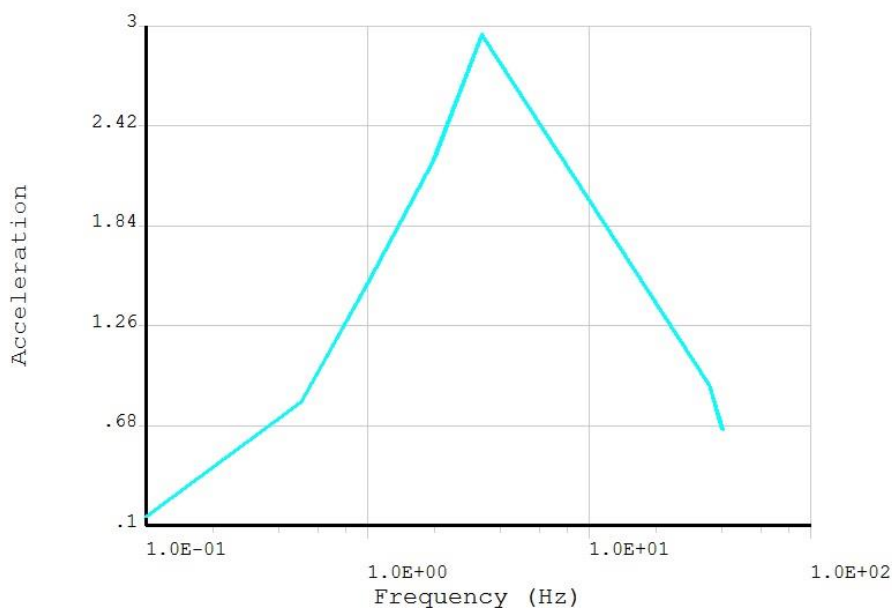


6.2. Спектр ответа, соответствующий акселерограмме СА-482

Для рассматриваемого объекта в случае линейно-спектрального анализа в качестве нагрузки был выбран обобщенный спектр ответа согласно [2], прил.3, п.2, соответствующий акселерограмме СА-482 (рис.6.2.1).



а) в горизонтальном направлении;

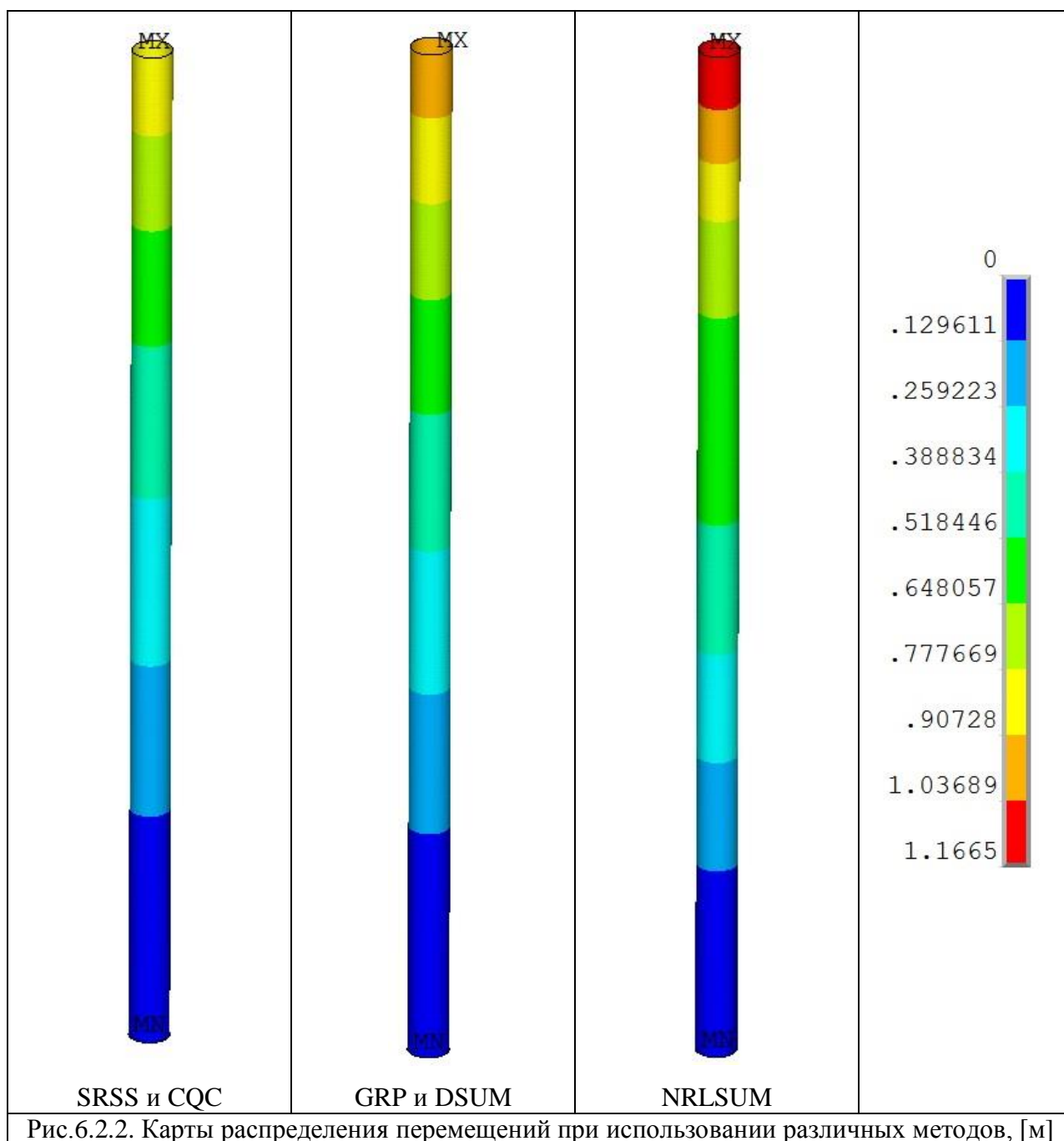


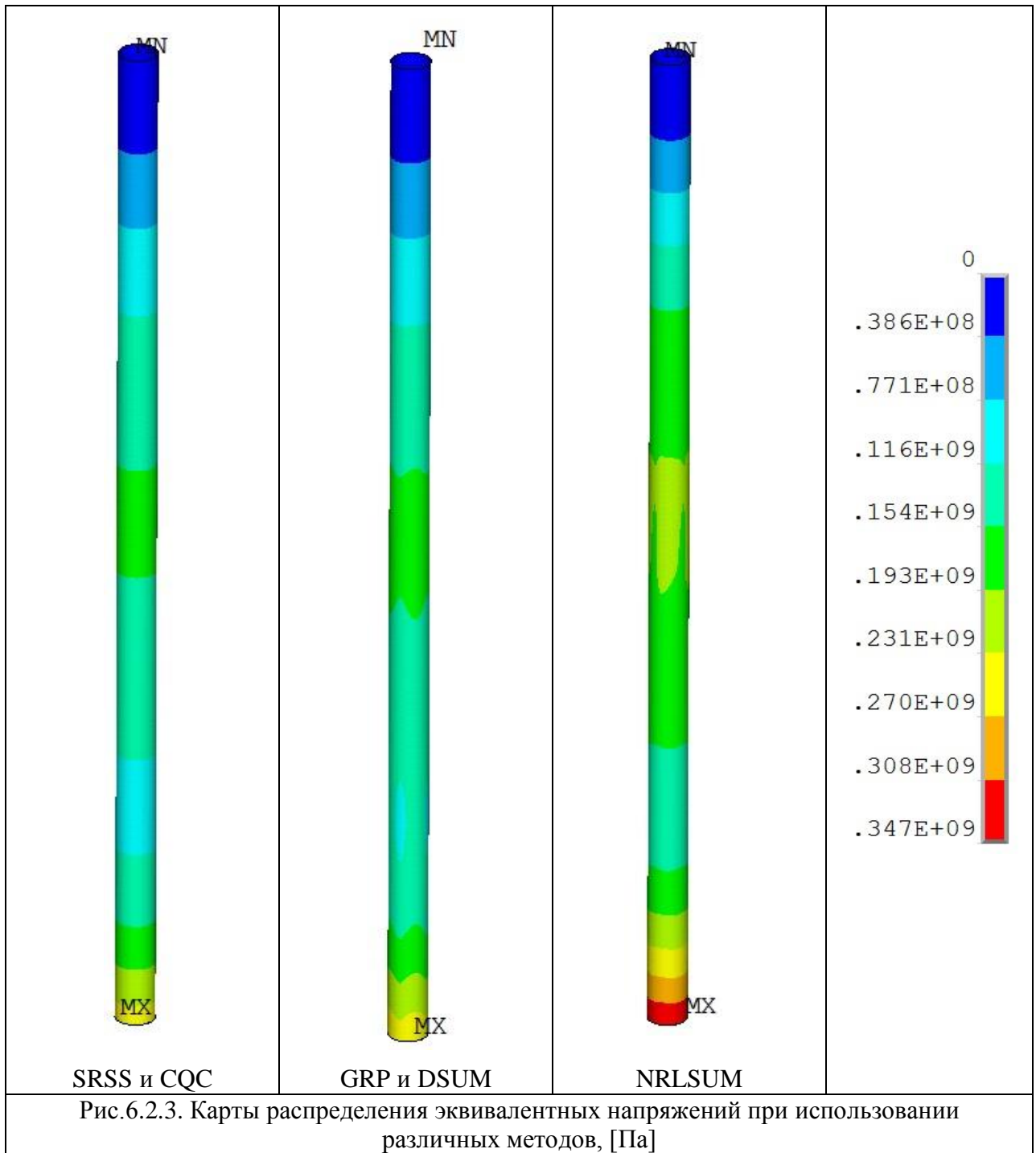
б) в вертикальном направлении.

Рис.6.2.1. Обобщенный спектр ответа

Согласно [1], прил.9, п.2.5.3 в расчете были учтены 93 первые собственные формы колебаний, т.к. собственная частота №93, равная 39,885 Гц – максимальное значение, входящее в заданный диапазон частот от 0 до 40 Гц в обобщенном спектре ответа.

Результаты расчета при проведении однофакторного **линейно-спектрального анализа** с различными методами комбинирования собственных форм колебаний представлены на рис.6.2.2 и рис.6.2.3.

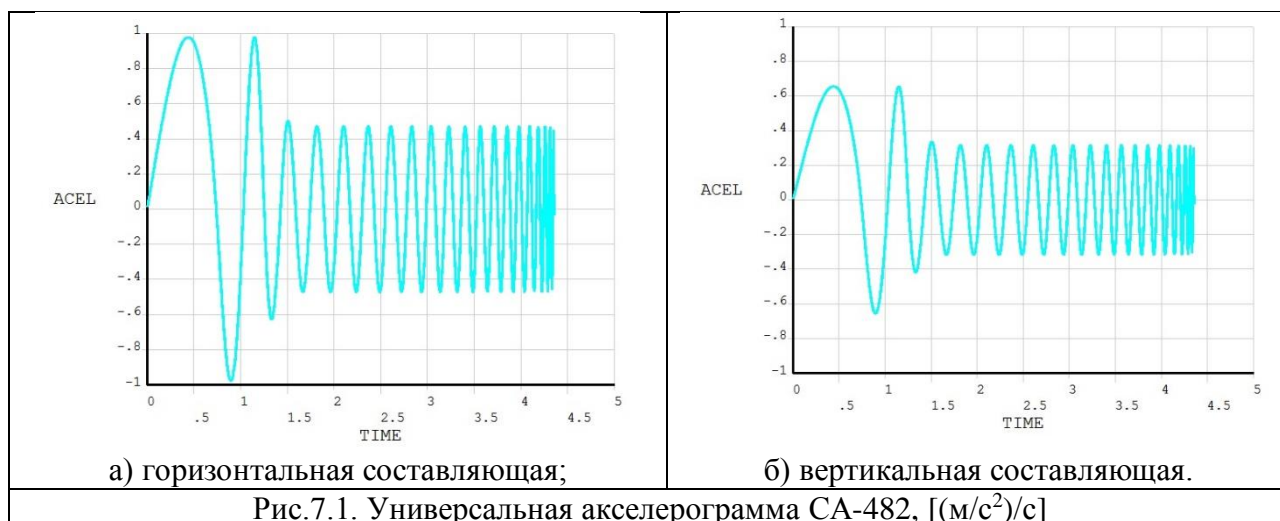




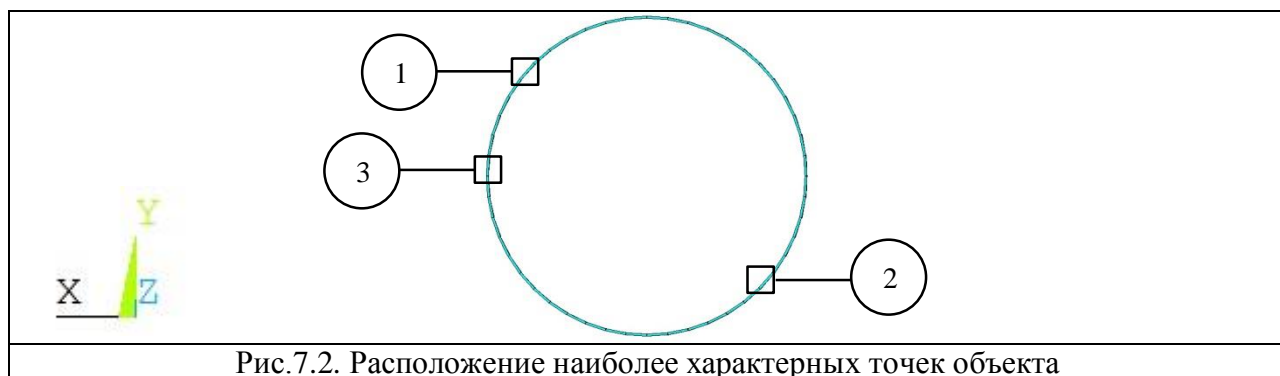
7. Динамический анализ переходных процессов

В случае динамического анализа переходных процессов в качестве нагрузки была использована оцифрованная универсальная акселерограмма СА-482 согласно [2], прил.3, п.1 (рис.7.1). Задача сводится к прямому определению закона колебаний конструкции и последующей оценке наиболее неблагоприятного состояния за все время моделируемого землетрясения.

Значения акселерограммы были приложены во всех точках крепления в направлениях соответствующих осям координат, при этом согласно [2], прил.3, п.5, в вертикальном направлении значения были умножены на коэффициент 0,67.



На рис.7.2 представлены наиболее характерные точки, расположенные в нижнем поперечном сечении объекта.



Результаты расчета при проведении полного динамического анализа переходных процессов представлены на рис.7.3.

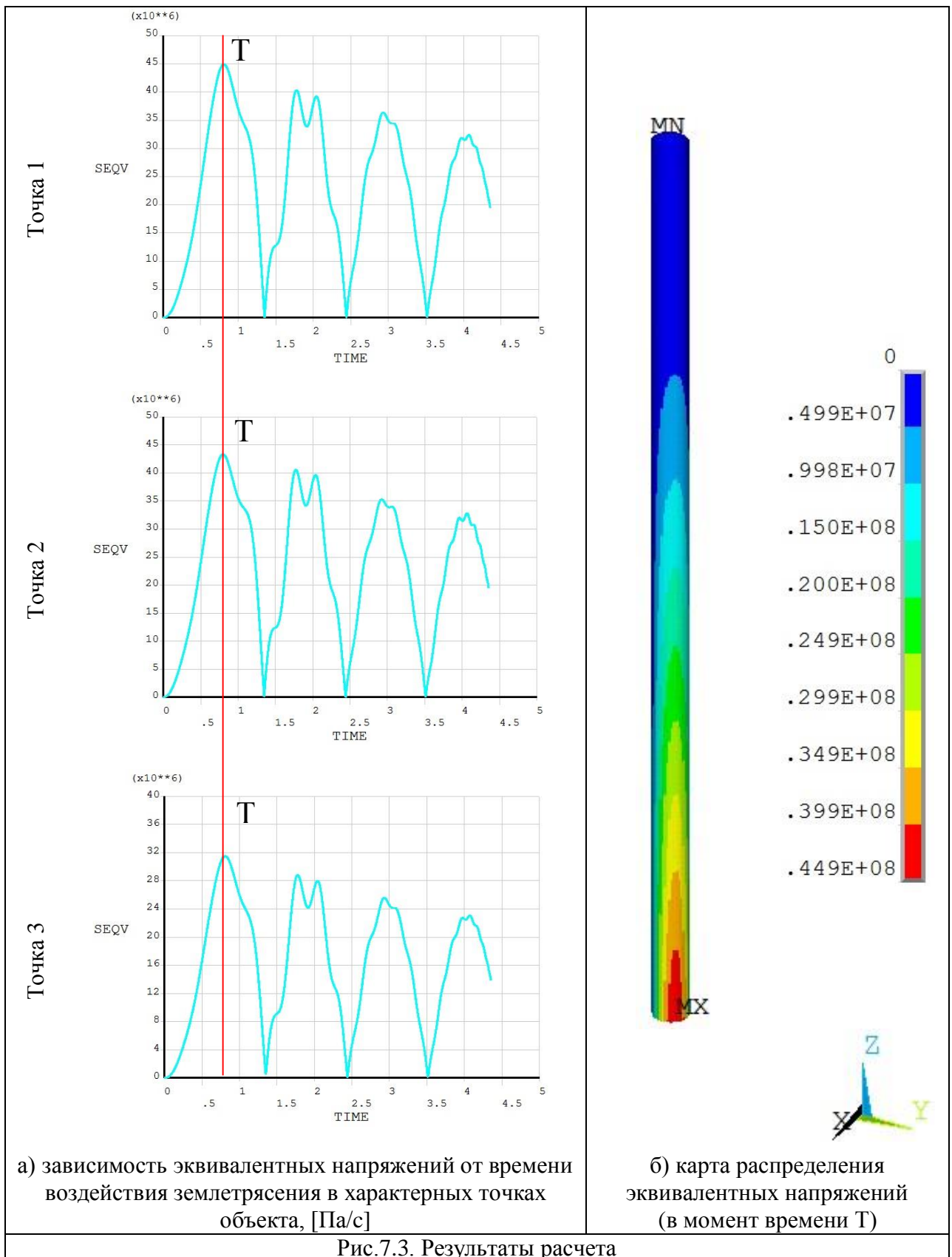


Рис.7.3. Результаты расчета

8. Заключение

Расчет по спектру ответа, соответствующему акселерограмме СА-482 дает **более консервативный результат** по напряжениям, чем расчет по спектру ответа согласно ПНАЭ Г-7-002-86, при этом характер распределения напряжений различается.

Применение **линейно-спектрального анализа** имеет свои преимущества и недостатки по сравнению с **динамическим анализом переходных процессов**:

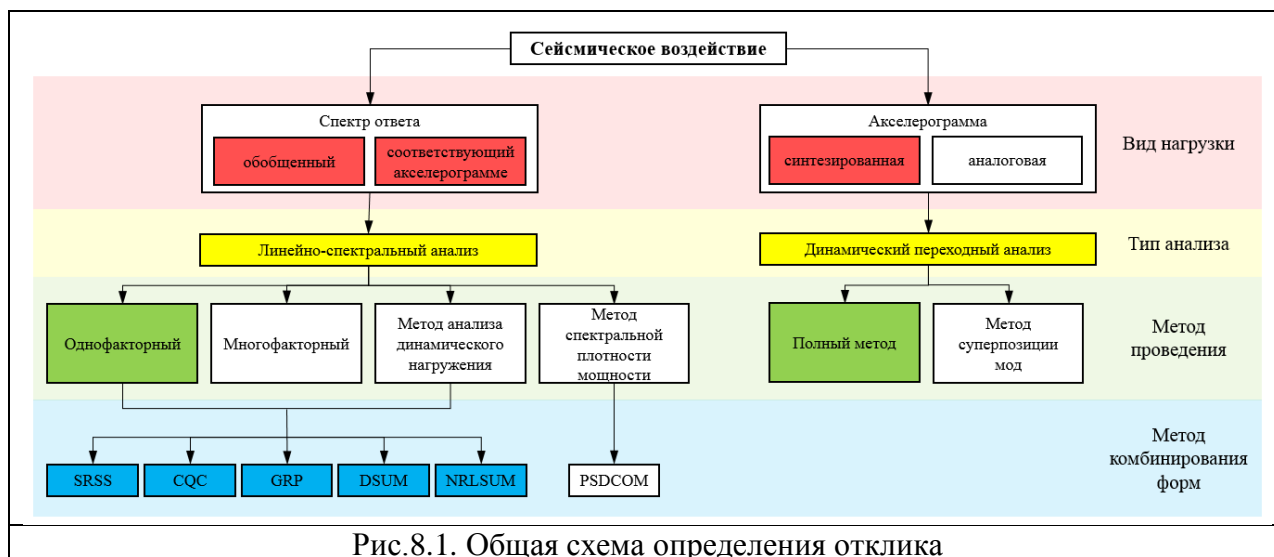
Преимущества:

- 1) экономия с точки зрения компьютерных затрат;
- 2) кривые спектров ответа можно найти в нормах расчета;
- 3) можно использовать для различных высот крепления объекта относительно фундамента.

Недостатки:

- 1) невозможность применения к нелинейным системам;
- 2) высокая консервативность.

Общая схема определения отклика на сейсмическое воздействие представлена на рис.8.1.



**цветом выделены реализованные в примерах варианты.*

В зависимости от условий и целей решаемой задачи необходимо выбирать соответствующий тип анализа.

Список литературы

1. **ПНАЭ Г-7-002-86.** Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1989.-525 с. – (Правила и нормы в атомной энергетике).
2. **РТМ 108.020.37-81.** Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии / НПО ЦКТИ, 1986.-35с.
3. **Решение задач динамики в ANSYS.** Краткое руководство пользователя. Екатеринбург, 2002.