



**Выпускная работа бакалавра техники и технологий
по направлению 150300 «Прикладная механика»**

***Конечно-элементное моделирование и
исследование пространственного напряженно-
деформированного состояния бака с жидкостью
под действием сейсмических нагрузок***

Выполнил студент гр. 4055/1

А.В. Лукин

Руководитель, к.т.н., профессор

А.И. Боровков

Соруководитель, ведущий инженер

В.С. Модестов

**Санкт-Петербург
2012**

Содержание

- 1. Основы расчета конструкций на сейсмостойкость**
- 2. Методы расчета конструкций на сейсмостойкость**
- 3. Исследование методов расчета на сейсмостойкость применительно к жестко заделанной на концах балке**
- 4. Основы расчета резервуаров с жидкостью на сейсмическое воздействие**
- 5. Определение собственных частот колебаний жидкости в резервуарах.**
- 6. Расчет резервуаров на сейсмическое воздействие с учетом присоединенных масс жидкости.**

Свободные и вынужденные колебания линейного неконсервативного осциллятора

Свободные колебания:

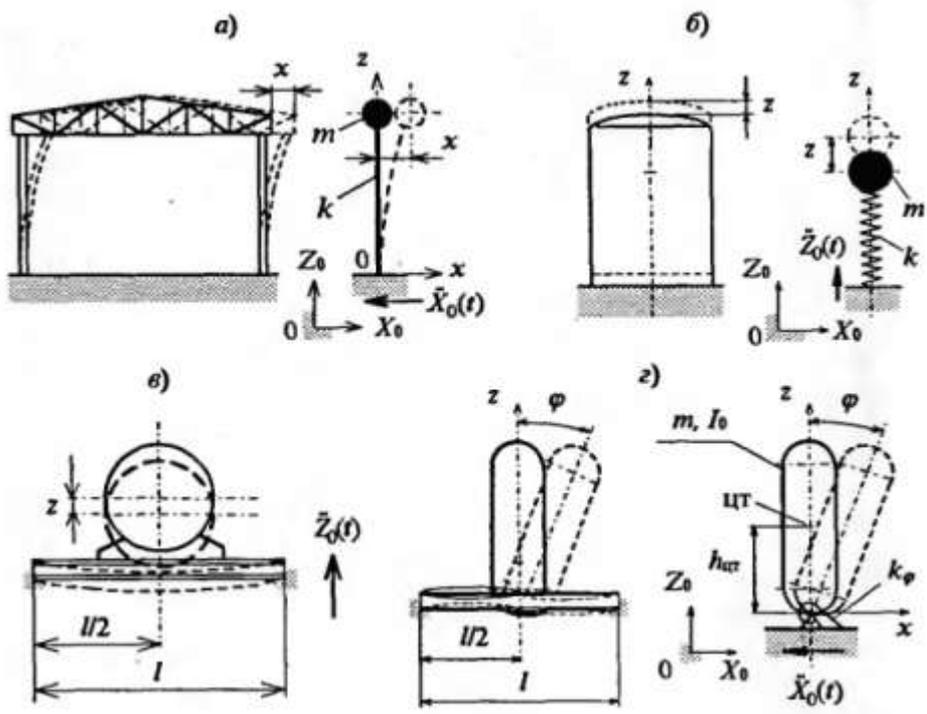
$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = 0$$

$$x = Ae^{-\zeta\omega t} \sin(\omega_D t + \alpha),$$

Вынужденные колебания:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{X}_0(t).$$

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{X}_0(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau.$$



$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \zeta = \frac{b}{2\omega m} = \frac{b}{2\sqrt{km}}$$

$\ddot{X}_0(t)$ – кинематическое (сейсмическое) возмущение

$$\ddot{x}_a = \ddot{x} + \ddot{X}_0.$$

$$\ddot{x}_a \approx -\omega_D^2 x \approx \omega_D \dot{x}.$$

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \zeta^2};$$

Свободные и вынужденные колебания дискретных систем

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{U_x\}\ddot{X}_0(t),$$

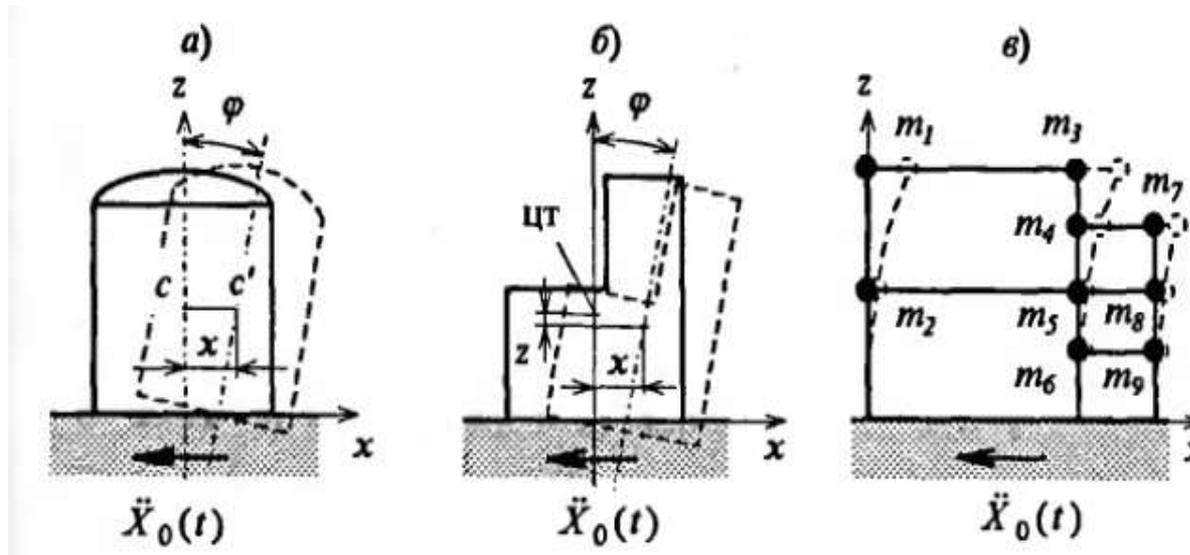
Модальная суперпозиция: $\{u(t)\} = \sum_{j=1}^n \{\phi_j\} q_j(t)$

$$\ddot{q}_j + 2\zeta\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\Gamma_j \ddot{X}_0(t),$$

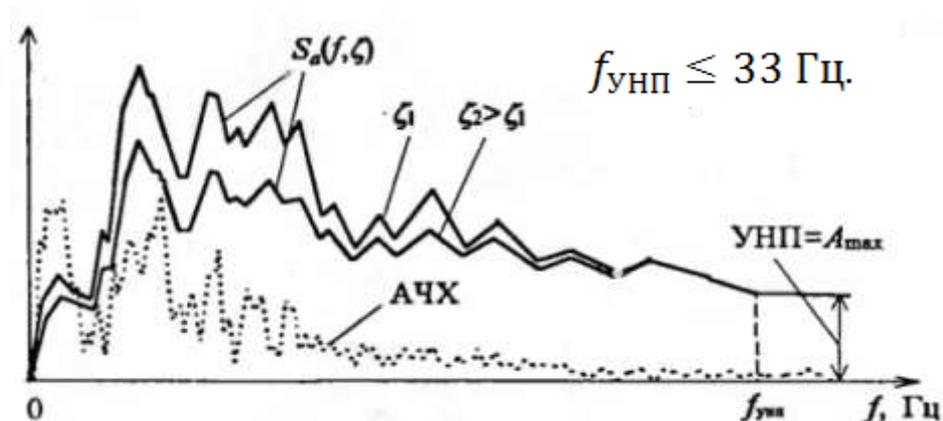
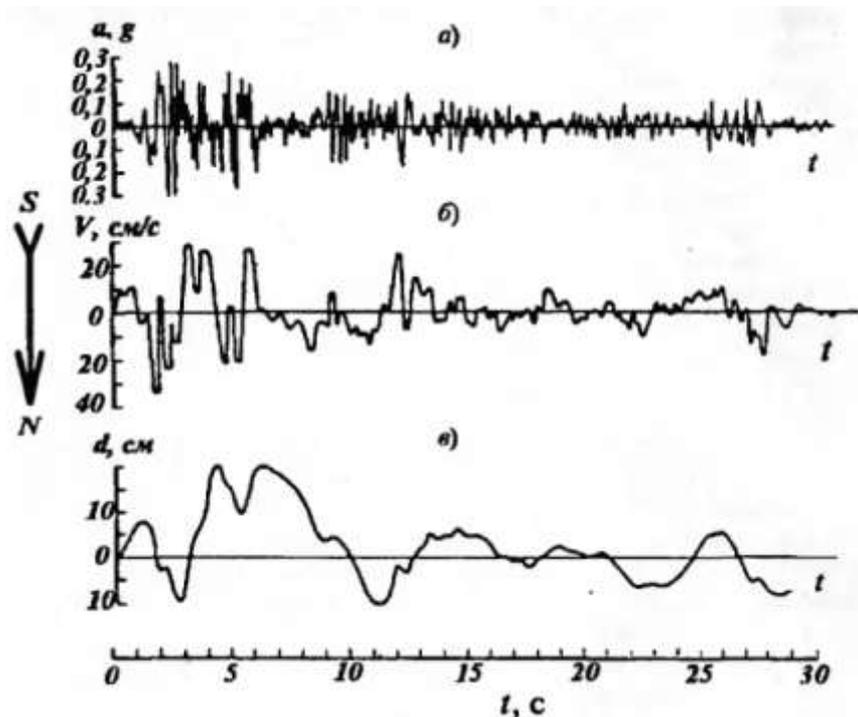
$$\Gamma_j = \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{U_x\}}{\|\phi_j\|^2}.$$

Условие ортогональности матрицы диссипации:

$$\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_j\} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j; \\ 2\zeta\omega_j \|\phi_j\|^2 & \text{при } i = j. \end{cases}$$



Исходная сейсмологическая информация



Спектр отклика $S_a(f, \zeta)$ и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) спектра Фурье акселерограммы землетрясения

Линейный осциллятор:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{X}_0(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau.$$

$$\frac{1}{2\pi f} S_a(f, \zeta) = S_v(f, \zeta) = 2\pi f S_d(f, \zeta)$$

Примеры записей сейсмических колебаний грунта (Эль-Центро, Калифорния, 18.05.1940, компонента N-S):

а) акселерограмма; б) велосигграмма; в) сейсмограмма

Синтезированная модель сейсмического воздействия СА-482

- Синтезированная акселерограмма
- Обобщенные безразмерные спектры коэффициента динамичности (СКД)

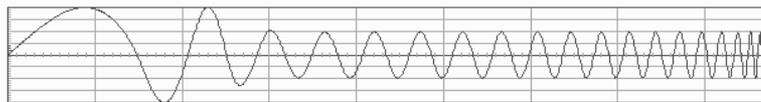


Рис. 1. СА - 482 : $A_{max} = .400 \text{ g}$, $T = 4.36 \text{ c}$
 шаг сетки графика: $a = .100 \text{ g}$, $t = .500 \text{ c}$

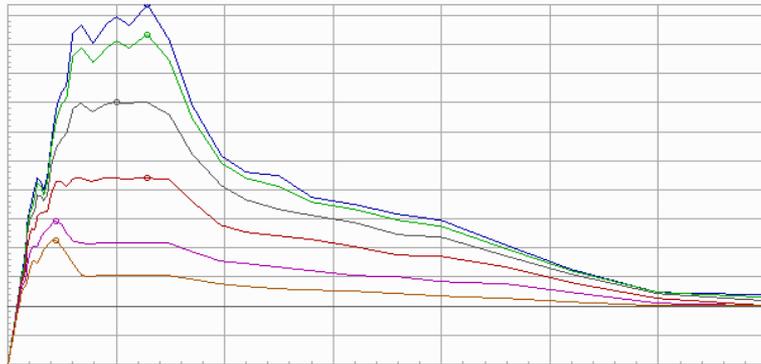
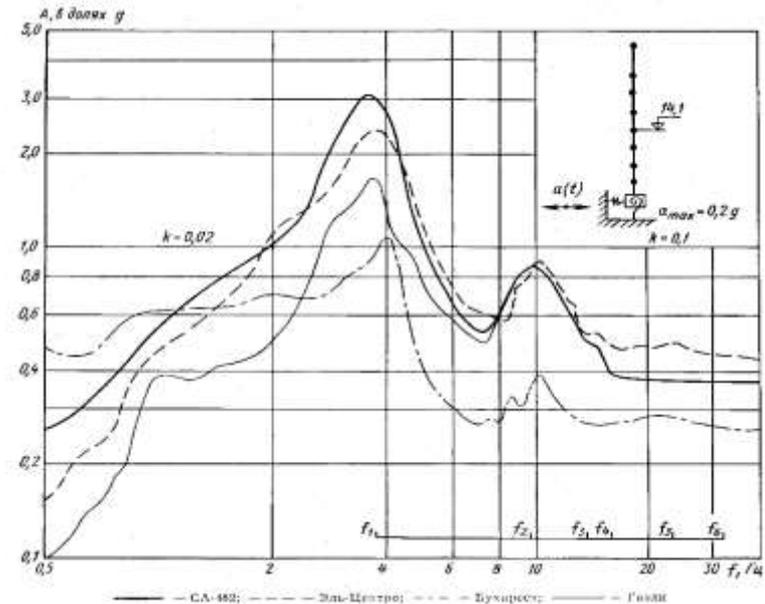


Рис. 2. Спектры Ответа акселерограммы $A(k, F)_{(g)}$ для частот $F=0 \dots 35.0 \text{ Гц}$;
 шаг_a= .200 g; $k=0, .005, .020, .050, .100, .150$; шаг_f= 5.00 Гц

Синтезированная акселерограмма (1) и её действительные спектры ответа (2) при $A_{max} = 0,4g$



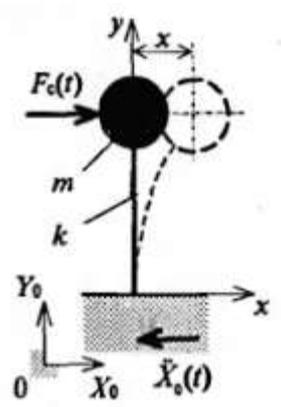
Поэтажные спектры ответа на отметке 14,1 м в здании реактора АЭС, полученные из расчетов на аналоговые акселерограммы и на СА-482

Метод динамического анализа в расчете на сейсмическое воздействие

- Нелинейные системы – прямое пошаговое интегрирование
- Линейные системы – метод модальной суперпозиции

Исходная сейсмологическая информация – акселерограммы движения основания

Дискретная линейная система с n степенями свободы:



$$\{F_c(t)\} = g[M]\{\ddot{u}_a(t)\}, \quad \{\ddot{u}_a(t)\} = \sum_{j=1}^n \{\eta_j\} [\ddot{\vartheta}_j(t) + \ddot{X}_0(t)].$$

$$q_j(t) = \Gamma_j \vartheta_j(t) \quad \{\eta_j\} = \{\phi_j\} \Gamma_j.$$

$$\{F_c(t)\} = g \sum_{j=1}^s [M] \{\eta_j\} \ddot{\vartheta}_{ja}(t).$$

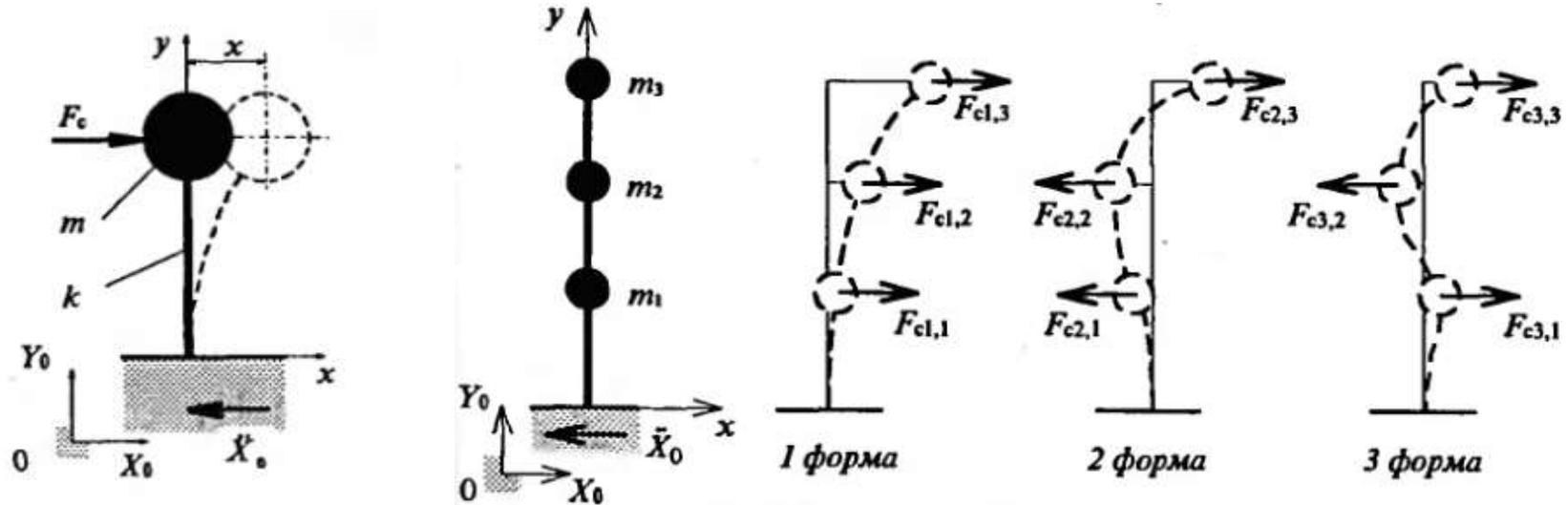
$\{r(t)\}$ - вектор откликов системы

$$\{r(t)\} = [T]\{F_c(t)\}, \quad [T] - \text{матрица перехода}$$

$$F_c(t) = -mg\ddot{x}_a(t)$$

$$\{r(t)\} = g \sum_{j=1}^s [T][M] \{\eta_j\} \ddot{\vartheta}_{ja}(t).$$

Линейно-спектральная теория сейсмостойкости



$$F_c = mgA_{max}S_a(f, \zeta)$$

$$\{F_{cj}\} = g[M]\{\eta_j\}A_{max}S_a(f_j, \zeta_j)$$

Модальный сейсмический отклик системы:

$$\{R_j\} = [T]\{F_{cj}\} = g[T][M]\{\eta_j\}A_{max}S_a(f_j, \zeta_j).$$

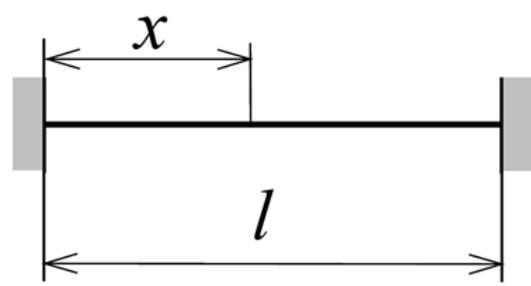
Суммарный (расчетный) отклик системы:

$$R_{ak} = \pm \sum_{j=1}^s |R_{jk}|. \quad R_{ak} = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^s R_{jk}^2}.$$

Другие методы суммирования, например:

$$R_{ak} = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^s R_{jk}^2 + 2 \sum_{l=1}^m \sum_{r=1}^m |R_{lk} R_{rk}|, \quad l \neq r,$$

Расчет балки на сейсмическое воздействие по линейно-спектральной теории



Континуальная расчетная схема балки

| | |
|-----------------------|------------------------|
| $E, \text{Па}$ | 2×10^{11} |
| $\rho, \text{кг/м}^3$ | 7800 |
| $l, \text{м}$ | 17 |
| $b, \text{м}$ | 0.025 |
| $h, \text{м}$ | 0.05 |
| $I, \text{м}^4$ | 2.604×10^{-7} |

Физические и геометрические параметры балки

| № частоты j | λ_j | Круговая частота $\omega_j, \text{рад/с}$ | Частота $f_j, \text{Гц}$ | $S_a^y(f_j, \zeta_j), \text{м/с}^2$ |
|---------------|-------------|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 4,71 | 5,755 | 0,916 | 8,855 |
| 2 | 7,86 | 15,985 | 2,544 | 17,722 |
| 3 | 10,996 | 31,331 | 4,987 | 21,582 |
| 4 | 14,137 | 51,793 | 8,243 | 20,368 |
| 5 | 17,279 | 77,37 | 12,314 | 18,165 |
| 6 | 20,42 | 108,06 | 17,199 | 15,521 |
| 7 | 23,562 | 143,87 | 22,897 | 12,436 |
| 8 | 26,704 | 184,79 | 29,41 | 8,911 |
| 9 | 29,845 | 230,83 | 36,738 | 5,204 |
| 10 | 32,987 | 281,98 | 44,879 | 3,924 |

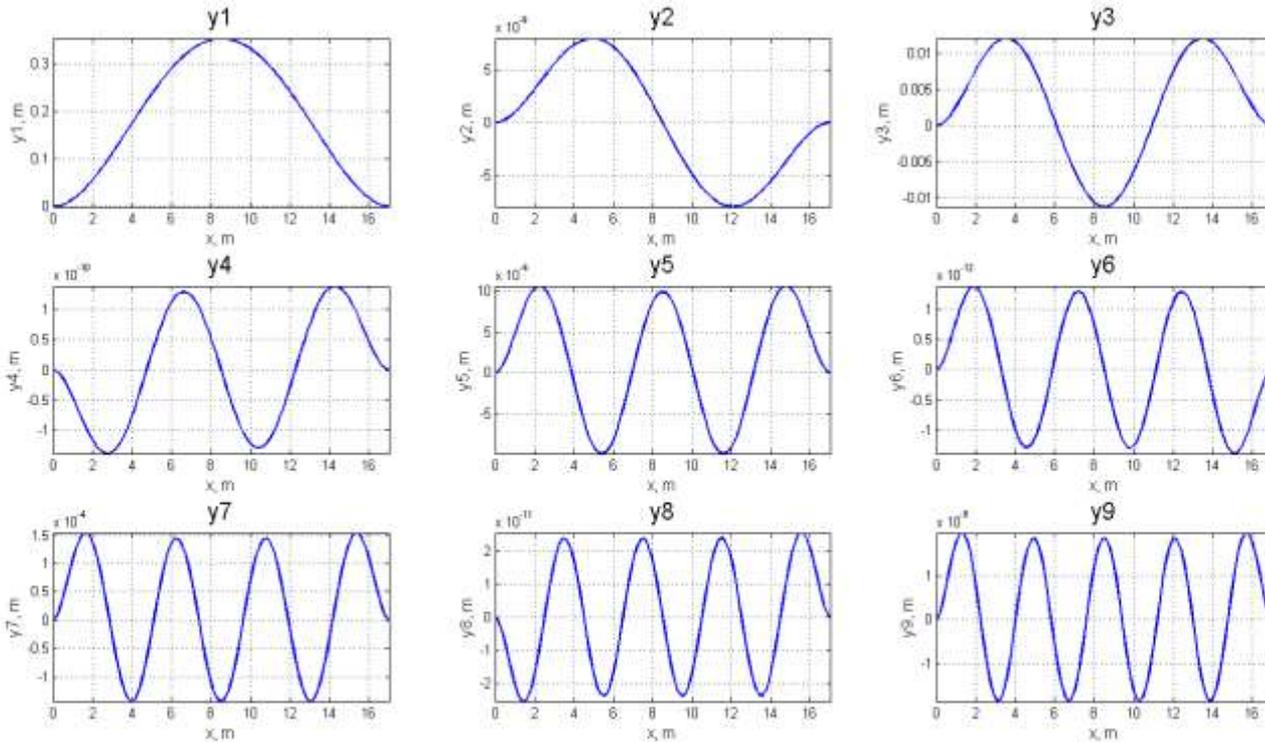
Собственные частоты и спектральные ускорения $S_a^y(f_j, \zeta_j)$ балки

$$\omega_n = \frac{\lambda_n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad \lambda_n = \frac{(2n+1)\pi}{2}$$

Коэффициент относительного затухания $\zeta = 0.005$

Максимальные модальные перемещения при сейсмическом возмущении:

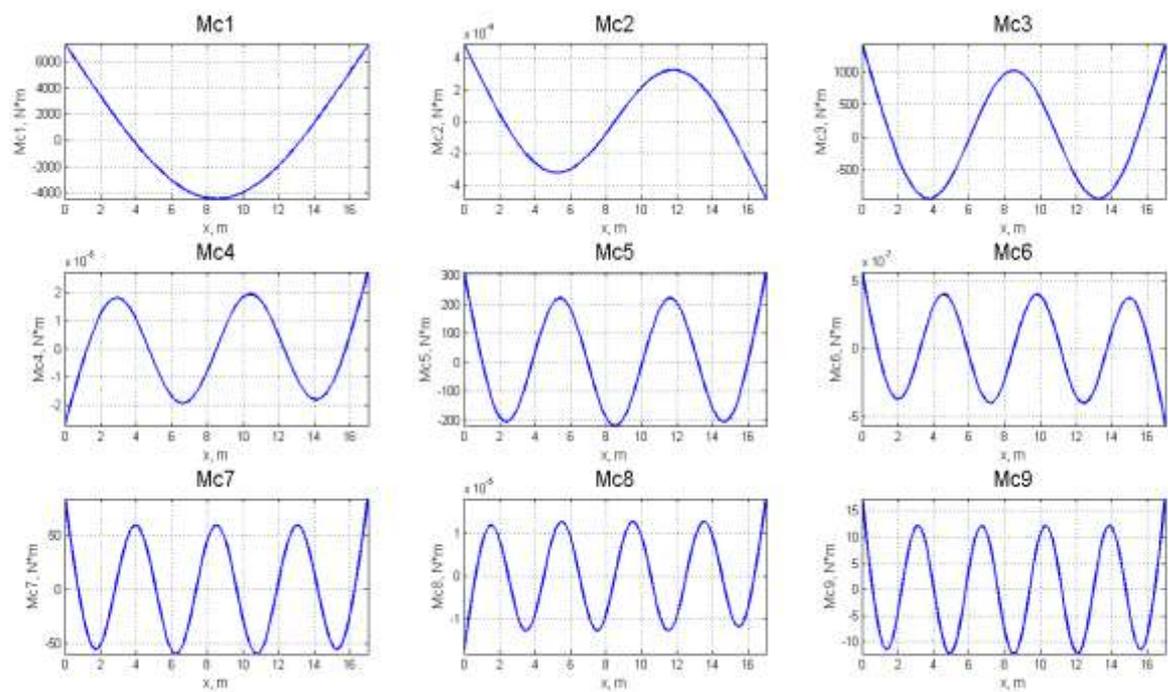
$$y_{cj}(x) = \frac{1}{\omega_j^2} g A_{max} S_a^y(f_j, \zeta_j) \Gamma_j \phi_j(x)$$



Распределения максимальных перемещений $y_{cj}(x)$, соответствующие первым девяти собственным формам

Модальные изгибающие моменты:

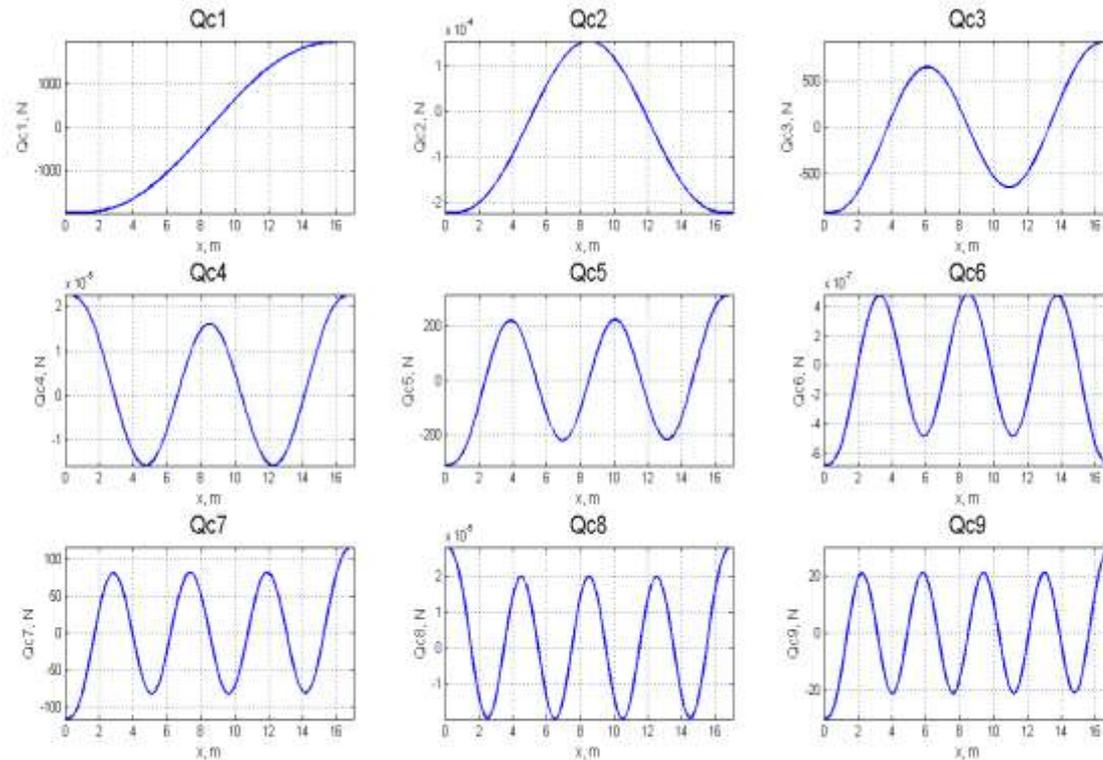
$$M_{c_j}(x) = EI \frac{1}{\omega_j^2} g A_{max} S_a^y(f_j, \zeta_j) \Gamma_j \frac{\partial^2 \phi_j(x)}{\partial x^2}$$



Распределения модальных моментов $M_{c_j}(x)$, соответствующие первым девяти собственным формам.

Модальные перерезывающие силы:

$$Q_{cj}(x) = EI \frac{1}{\omega_j^2} g A_{max} S_a^y(f_j, \zeta_j) \Gamma_j \frac{\partial^3 \phi_j(x)}{\partial x^3}$$



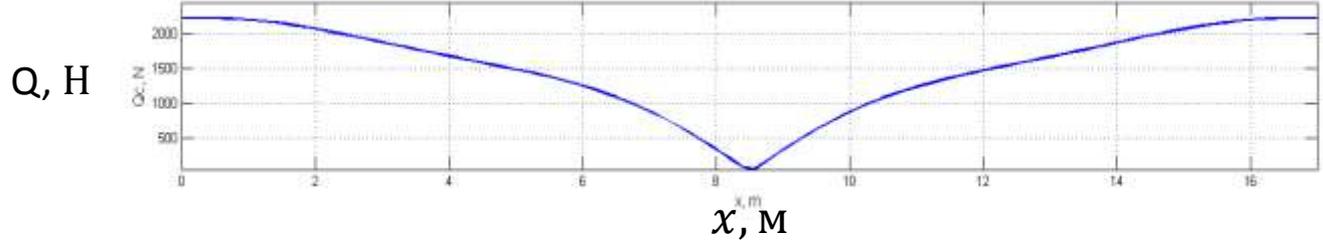
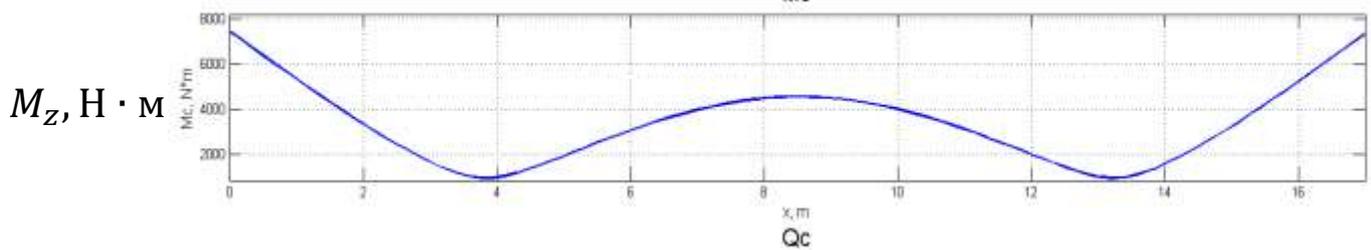
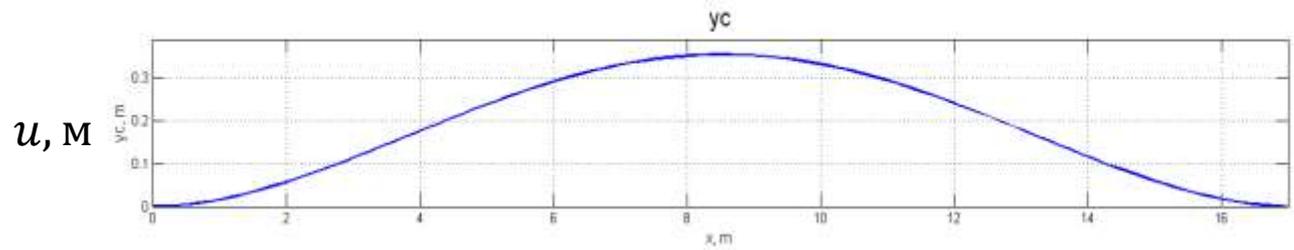
Распределения модальных перерезывающих сил $Q_{cj}(x)$, соответствующие первым девяти собственным формам.

Суммарные перемещения и сейсмические усилия, вычисленные по правилу $R_{ak} = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^s R_{jk}^2}$.

$$y_c(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^9 y_{cj}^2(x)},$$

$$M_c(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^9 M_{cj}^2(x)},$$

$$Q_c(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^9 Q_{cj}^2(x)}.$$



Суммарные перемещения, изгибающие моменты и перерезывающие силы, вычисленные по правилу ККСК

Расчет балки на сейсмическое воздействие по линейно-спектральной теории в ANSYS

ANSYS «Single-Point Response Spectrum (SPRS) Analysis»



| | |
|---------------------------------------|---------|
| Тип элемента | Beam188 |
| Количество узлов N_{NODE} | 41 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 40 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 82 |

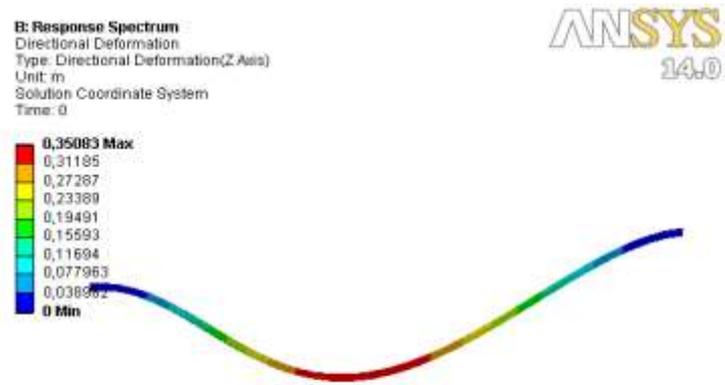
| Номер частоты j | Частота f_j , Гц | Эффективная масса M_j^{eff} , кг | $M_j^{eff} / M_{полн}$, ед. |
|-------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0,923 | 114,424 | 0,690 |
| 2 | 2,543 | 0,000 | 0,000 |
| 3 | 4,985 | 21,936 | 0,132 |
| 4 | 8,24 | 0,000 | 0,000 |
| 5 | 12,308 | 8,886 | 0,054 |
| 6 | 17,188 | 0,000 | 0,000 |
| 7 | 22,881 | 4,781 | 0,029 |
| 8 | 29,387 | 0,000 | 0,000 |
| 9 | 36,706 | 2,982 | 0,018 |
| 10 | 44,84 | 0,000 | 0,000 |

Метод Хаусхолдера нахождения собственных частот (*Reduced mode extraction method*).
 Главные степени свободы (*Master Degrees of Freedom*) – перемещения u_z

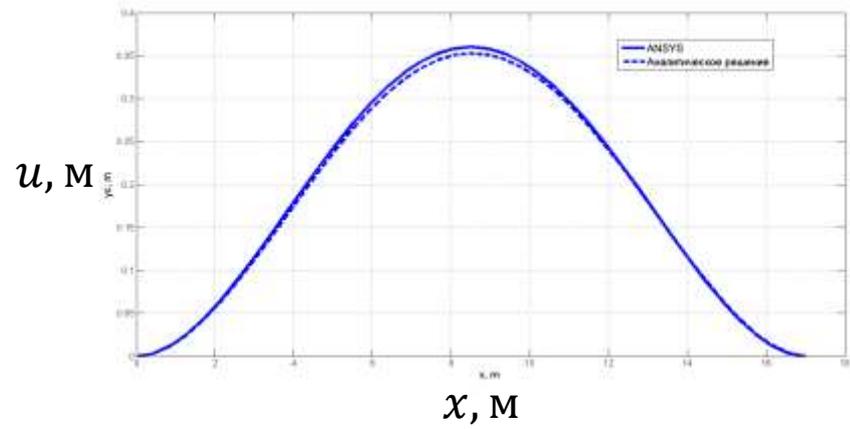
$$M_j^{eff} = \Gamma_j^2 m_j^*$$

$$\sum_{j=1}^{10} M_j^{eff} = 153.007 \text{ кг}$$

(92% от полной массы конструкции)

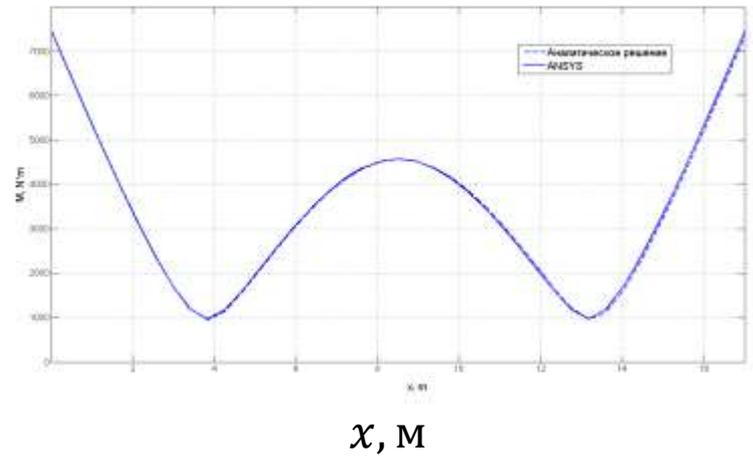


Распределение максимальных перемещений балки под действием сейсмического возмущения



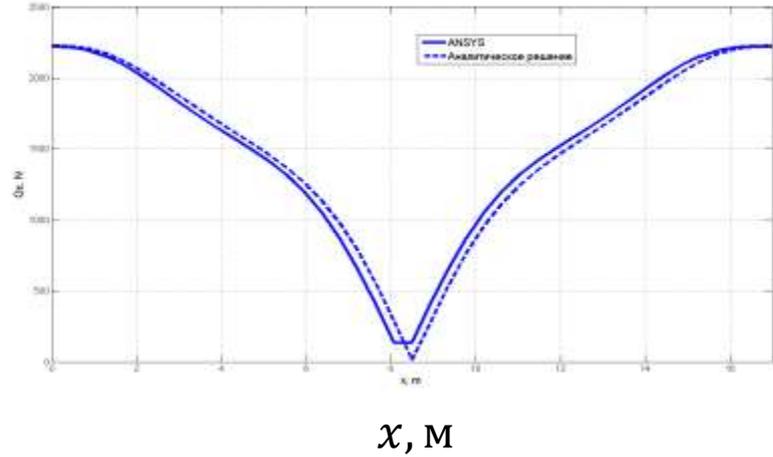
Распределение максимальных перемещений балки под действием сейсмических нагрузок в сравнении с аналитическим решением

$M_z, \text{H} \cdot \text{м}$



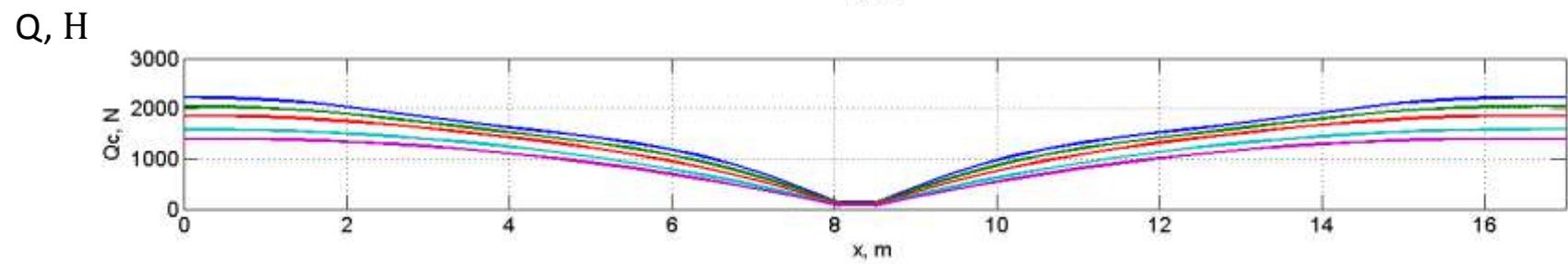
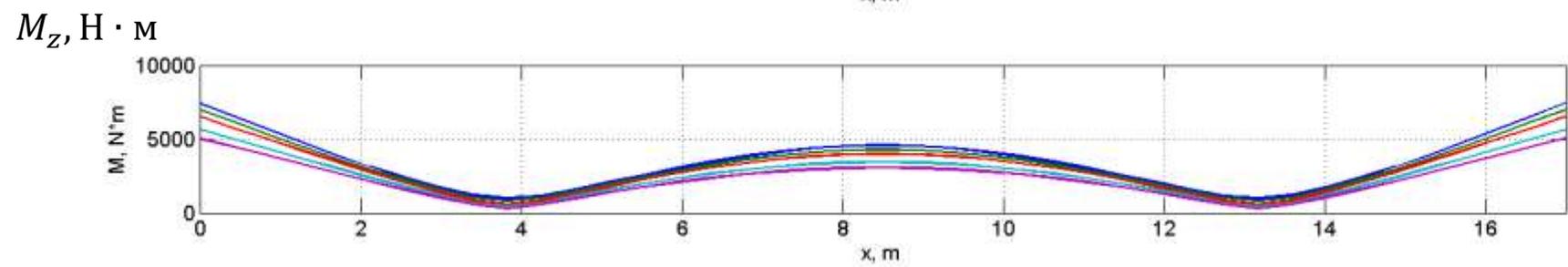
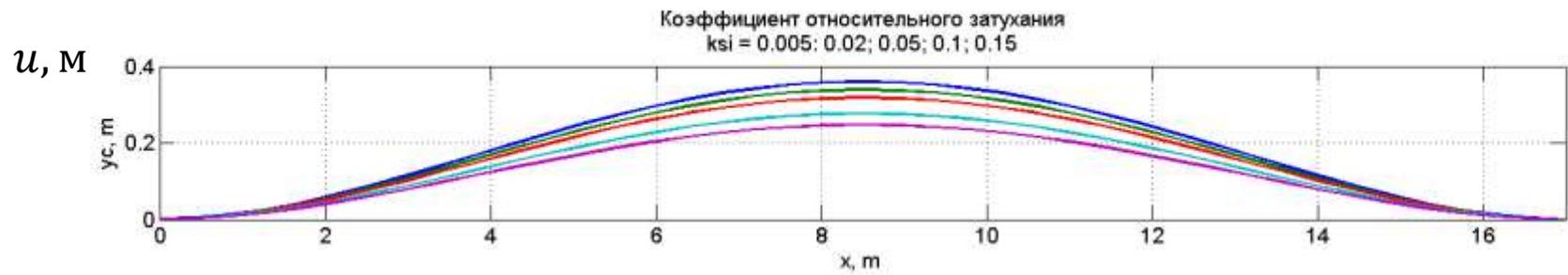
Распределение суммарного изгибающего момента, полученное в ANSYS, в сравнении с аналитическим решением

Q, H



Распределение суммарного поперечной силы, полученное в ANSYS, в сравнении с аналитическим решением

Исследование влияния коэффициентов относительного затухания



Перемещения, изгибающие моменты и перерезывающие силы
для различных значений коэффициента затухания

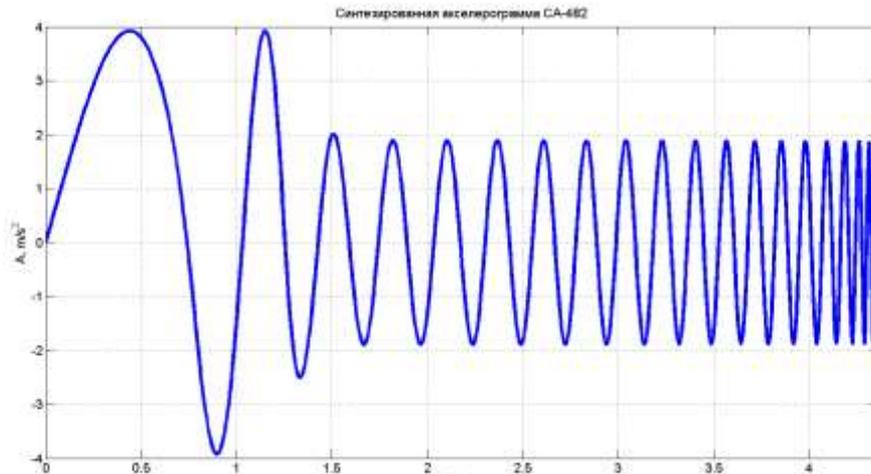
Расчет балки на сейсмическое воздействие методом динамического анализа в ANSYS

ANSYS *Transient Structural Analysis*



| | |
|---------------------------------------|---------|
| Тип элемента | Beam188 |
| Количество узлов N_{NODE} | 41 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 40 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 82 |

Сейсмическая нагрузка – переменное по времени ускорение балки в направлении OZ



Синтезированная акселерограмма СА-482

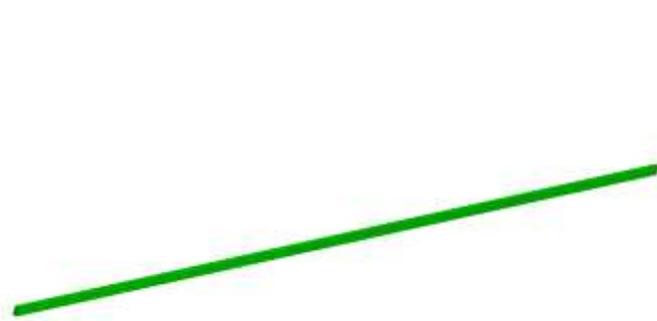
Коэффициент относительного затухания

$$\zeta = 0.005$$

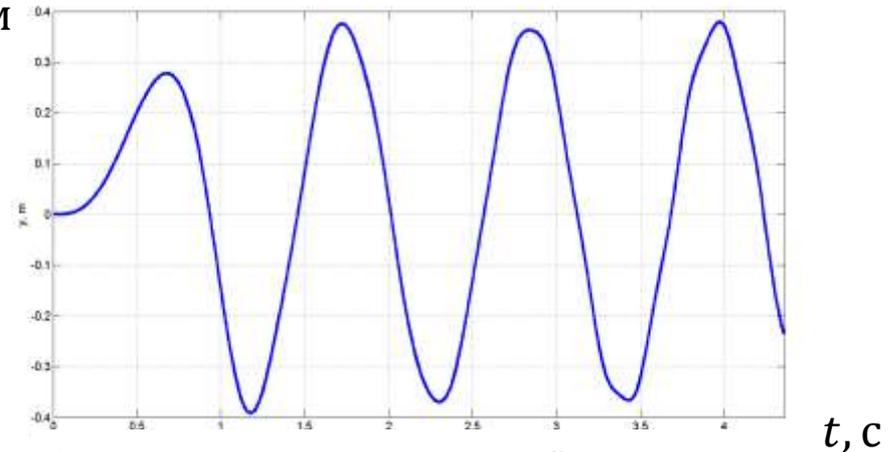
$$dt = 0.005 \text{ c};$$

$$t^{\text{кон}} = 4.36 \text{ c}$$

Результаты расчета методом динамического анализа

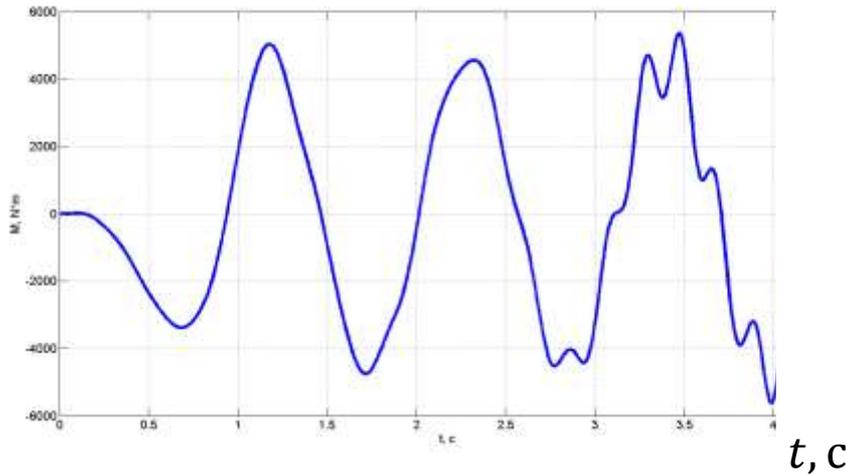


ANSYS U, M

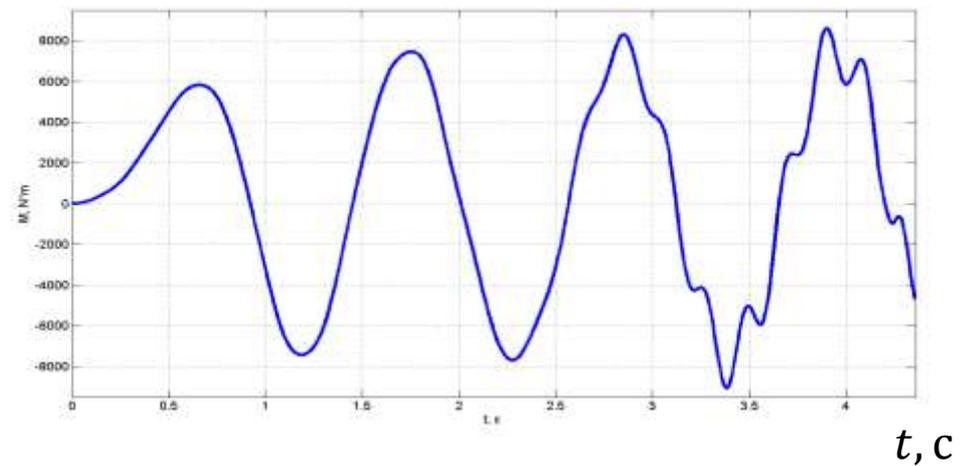


Зависимость от времени перемещений в срединном поперечном сечении балки ($x = \frac{l}{2} = 8.5$ м)

$M_z, \text{Н} \cdot \text{м}$

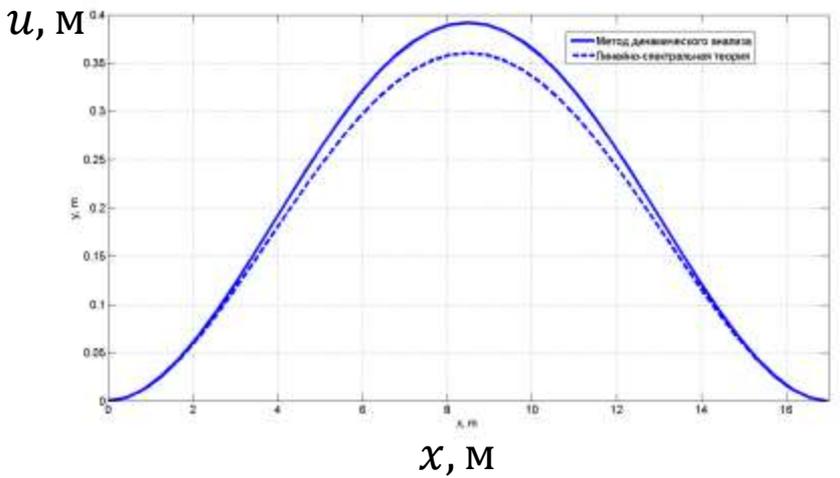


Зависимость от времени изгибающего момента в срединном поперечном сечении балки ($x = \frac{l}{2} = 8.5$ м)

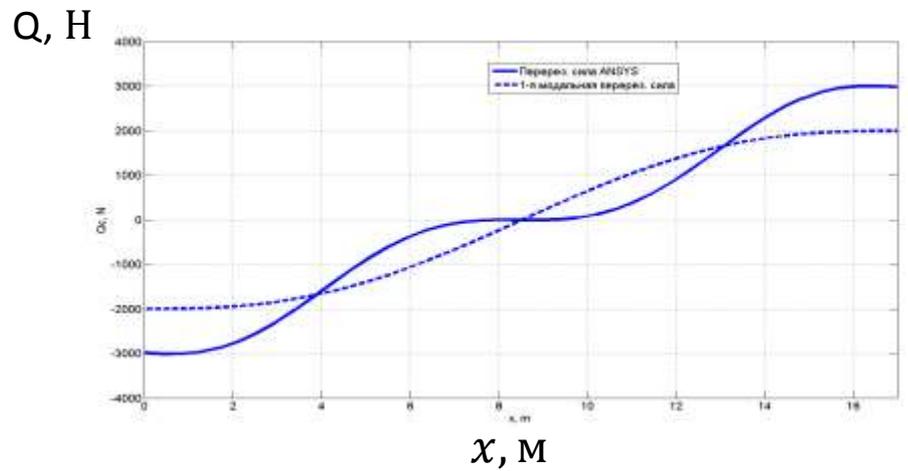


Зависимость от времени изгибающего момента в заделке

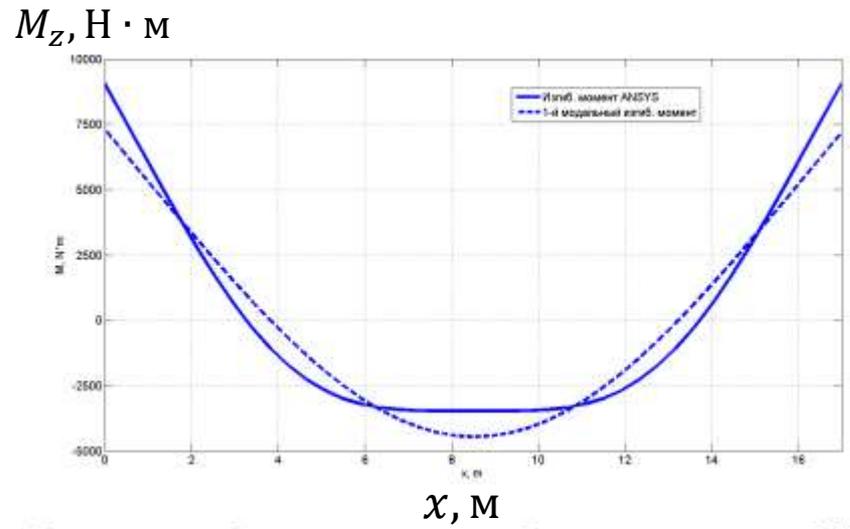
Сравнение с линейно-спектральной теорией



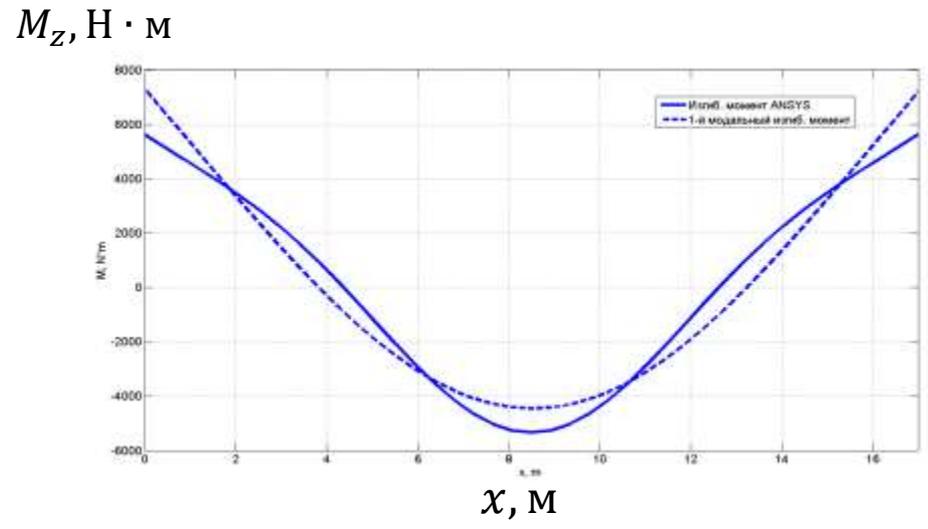
Распределение перемещений по длине балки в момент времени $t = 1.18$ с, в сравнении с результатом расчета по линейно-спектральной теории



Распределение перерезывающей силы по длине балки в момент времени $t = 3.47$ с, в сравнении с первой модальной перерезывающей силой



Распределение изгибающего момента по длине балки в момент времени $t = 3.39$ с, в сравнении с первым модальным изгибающим моментом



Распределение изгибающего момента по длине балки в момент времени $t = 3.47$ с, в сравнении с первым модальным изгибающим моментом

Сравнительный анализ результатов расчета по линейно-спектральной теории и методом динамического анализа

| | Линейно-спектральная теория | Метод динамического анализа | $\delta, \%$ |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| $ y _{max}, \text{ м}$ | 0.3603 | 0.3919 | 8.06 |
| $ M^{изг} _{max}, \text{ кН} \cdot \text{ м}$ | 7.473 | 9.056 | 17.48 |
| $ Q^{пер} _{max}, \text{ кН}$ | 2.224 | 3.006 | 26.01 |

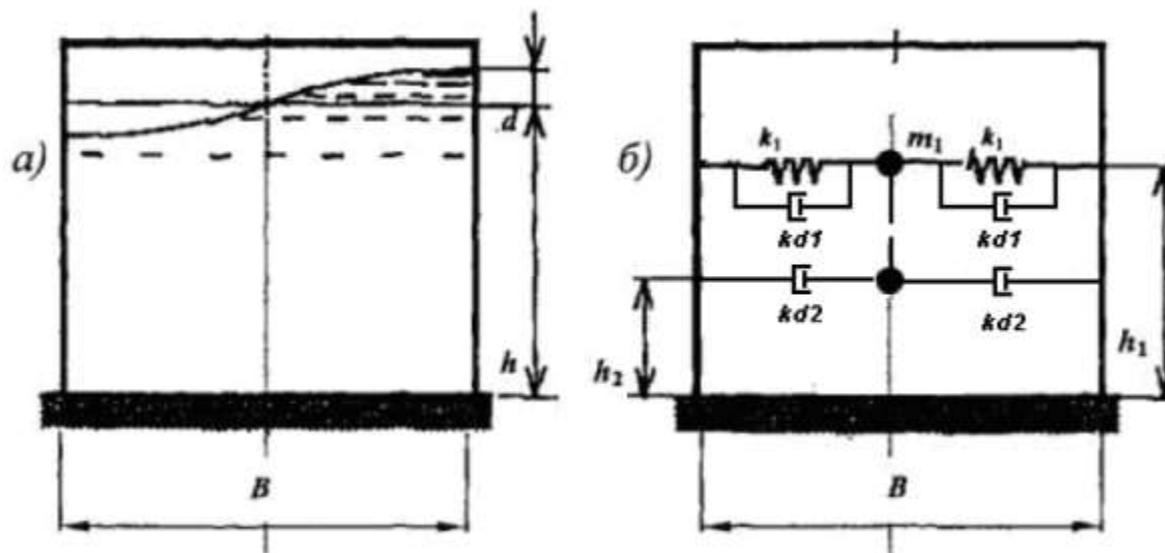
Сравнительный анализ результатов расчета по ЛСТ и МДА

Вывод: для расчета на сейсмостойкость ответственных конструкций (в особенности, элементов АЭС), имеющих собственные частоты в области преобладающих частот землетрясения, необходимо применять как линейно-спектральный метод, так и метод динамического анализа.

Расчет резервуаров с жидкостью на сейсмическое воздействие с использованием присоединенных масс жидкости

Разделение сейсмического давления жидкости на две части:

- Импульсивная часть
- Конвективная часть



Динамическая модель резервуара с жидкостью:

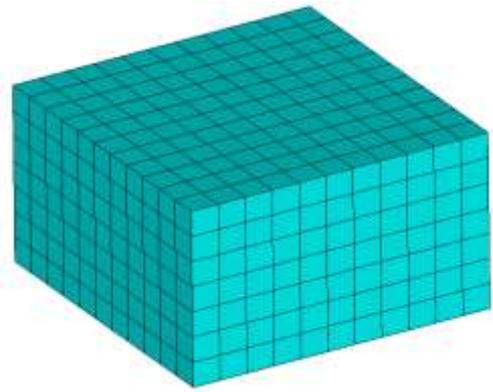
а) колебания жидкости в резервуаре; б) динамическая модель

h – уровень жидкости в резервуаре; d – высота волны; m_1 – кинематическая (конвективная) масса; m_2 – инерционная (импульсивная) масса; h_1, h_2 – высоты привязки кинематической и инерционной масс; k_1 – жесткость упругих связей; k_{d1}, k_{d2} – коэффициенты демпфирования; $B = 2l$ или $2R$ – горизонтальный размер резервуара (ширина или диаметр).

Расчетные параметры для определения динамического взаимодействия жидкости с резервуаром

| № | Наименование | Прямоугольный резервуар | Цилиндрический резервуар |
|----|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Импульсивная масса | $m_2 = m \frac{\hat{h}}{\sqrt{3}} th \frac{\sqrt{3}}{\hat{h}}$ | |
| 2 | Конвективная масса | $m_1 = m \frac{0.53th(1.58\hat{h})}{\hat{h}}$ | $m_1 = m \frac{0.46th(1.84\hat{h})}{\hat{h}}$ |
| 3 | Высота приложения импульсивной силы | $h_2 = 0.38h \left[1 + \alpha \left(\frac{m}{m_2} - 1 \right) \right]$ | |
| 4 | Высота приложения конвективной силы | $h_1 = h \left[1 - \frac{ch(1.58\hat{h}) - \beta}{(1.58\hat{h})sh(1.58\hat{h})} \right]$ | $h_1 = h \left[1 - \frac{ch(1.84\hat{h}) - \beta}{(1.84\hat{h})sh(1.84\hat{h})} \right]$ |
| 5 | Частота колебаний жидкости | $\omega^2 = \frac{1.58g}{l} th(1.58\hat{h})$ | $\omega^2 = \frac{1.84g}{R} th(1.84\hat{h})$ |
| 6 | Жесткость присоединения конв. массы | $k_1 = \omega^2 m_1$ | |
| 7 | Коефф. конвективной силы | $\theta_h = \frac{1.58S_d(\omega)}{l} th(1.58\hat{h})$ | $\theta_h = \frac{1.84S_d(\omega)}{R} th(1.84\hat{h})$ |
| 8 | Импульсивная сила | $P_2 = m_2 g A_{max}$ | |
| 9 | Конвективная сила | $P_1 = m_1 g \theta_h \sin \omega t$ | $P_1 = 1.2 m_1 g \theta_h \sin \omega t$ |
| 10 | Максимальная высота волны | $d_{max} = \frac{0.527lch(1.58\hat{h})}{\frac{g}{\omega^2 \theta_h l} - 1}$ | $d_{max} = \frac{0.408Rch(1.84\hat{h})}{\frac{g}{\omega^2 \theta_h R} - 1}$ |

Определение собственных частот колебаний жидкости для прямоугольного резервуара



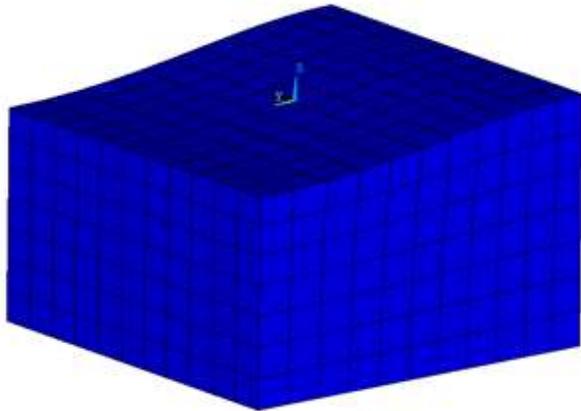
| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Жидкость | Вода при $T = 25^{\circ}\text{C}$ |
| Модуль объемного расширения k , Па | 2.2×10^9 |
| Плотность ρ , кг/м ³ | 998 |
| Динамическая вязкость, Па · с | 8.9×10^{-4} |

Конечно-элементная модель жидкости в прямоугольном резервуаре

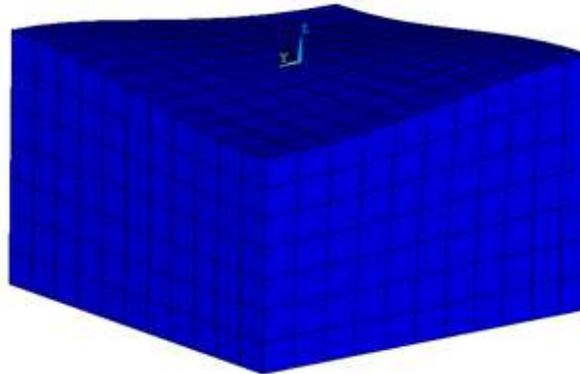
Метод Хаусхолдера нахождения собственных частот (*Reduced mode extraction method*). Главные степени свободы (*Master Degrees of Freedom*) – вертикальные перемещения u_z . В расчете учитывалась сила тяжести.

| | |
|---------------------------------------|---------|
| Тип элемента | FLUID80 |
| Количество узлов N_{NODE} | 1152 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 847 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 3456 |

Собственные формы и собственные частоты колебаний жидкости



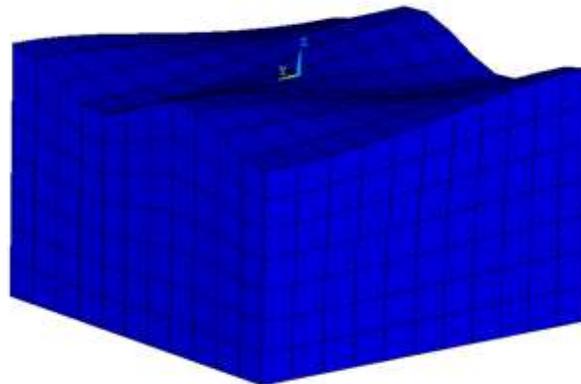
$$f_1 = 0.37711 \text{ Гц}$$



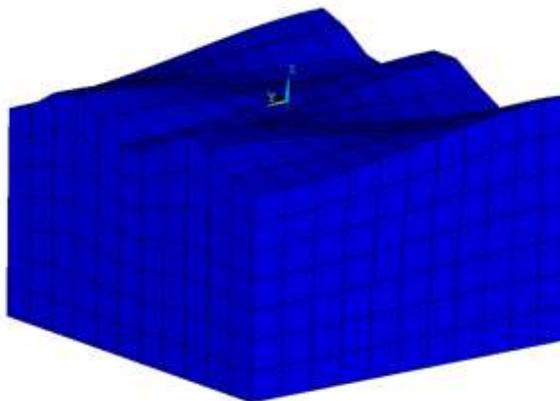
$$f_2 = 0.37714 \text{ Гц}$$



$$f_3 = 0.3772 \text{ Гц}$$



$$f_4 = 0.3774 \text{ Гц}$$

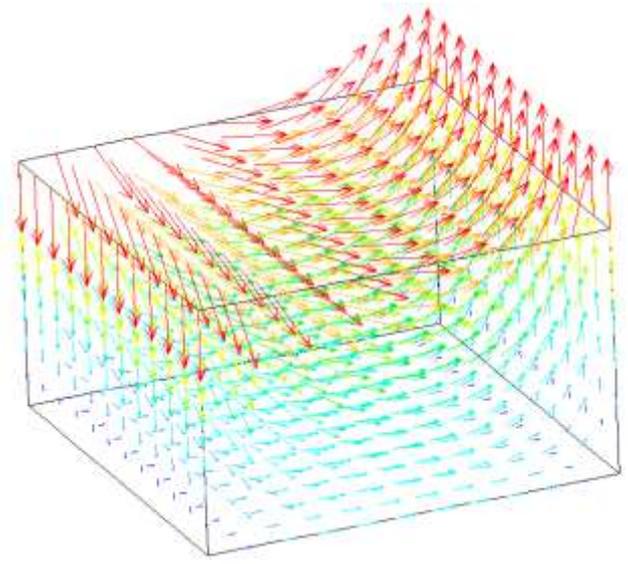


$$f_5 = 0.3775 \text{ Гц}$$



$$f_6 = 0.3777 \text{ Гц}$$

Исследование зависимости первой собственной частоты от относительной глубины резервуара

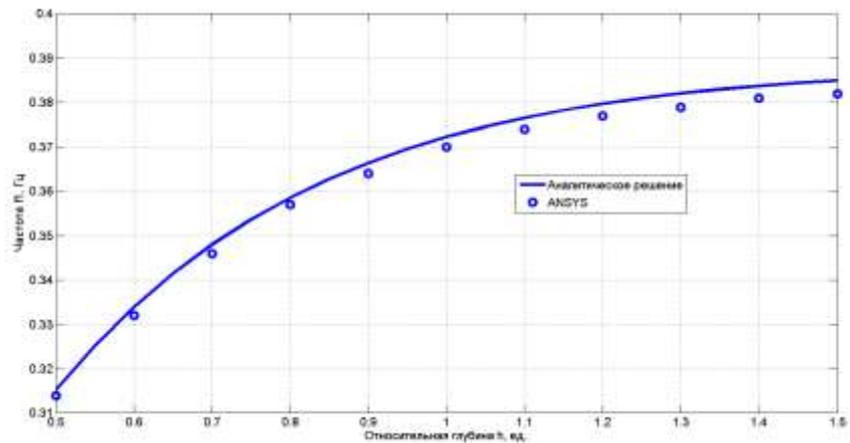


Векторное поле перемещений на первой частоте колебаний жидкости $f_1 = 0.37711$ Гц

Аналитическое выражение для первой частоты:

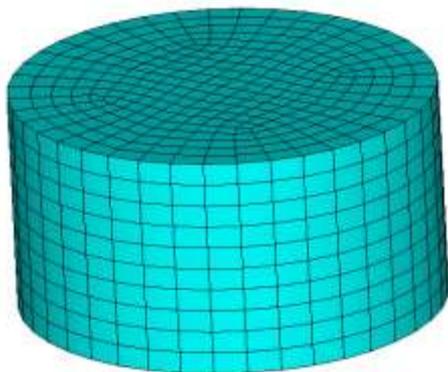
$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g\pi}{L} th(\pi\hat{h})}$$

$\hat{h} = h/L$ – относительная глубина резервуара



Относительная глубина резервуара \hat{h}

Определение собственных частот колебаний жидкости для цилиндрического резервуара



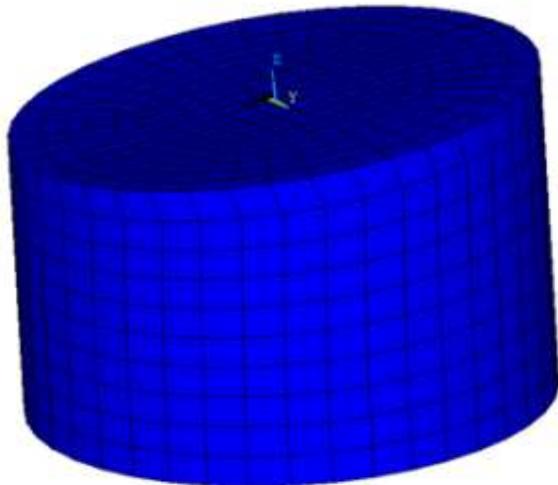
Конечно-элементная модель жидкости в цилиндрическом резервуаре

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Жидкость | Вода при $T = 25^{\circ}\text{C}$ |
| Модуль объемного расширения k , Па | 2.2×10^9 |
| Плотность ρ , кг/м ³ | 998 |
| Динамическая вязкость, Па · с | 8.9×10^{-4} |

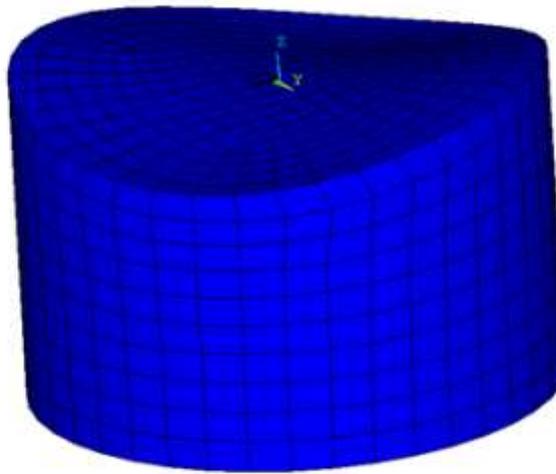
Метод Хаусхолдера нахождения собственных частот (*Reduced mode extraction method*).
 Главные степени свободы (*Master Degrees of Freedom*) – вертикальные перемещения u_z .
 В расчете учитывалась сила тяжести.

| | |
|---------------------------------------|---------|
| Тип элемента | FLUID80 |
| Количество узлов N_{NODE} | 3531 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 3300 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 10593 |

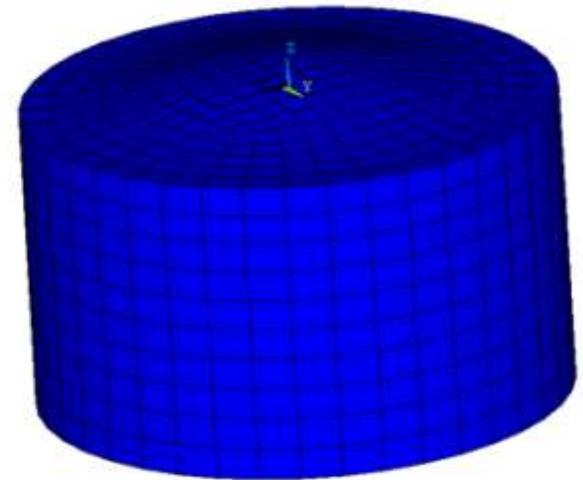
Собственные формы и собственные частоты колебаний жидкости



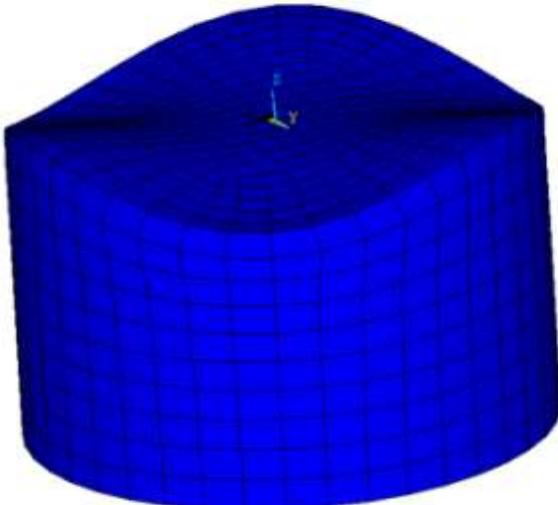
$$f_1 = 0.39 \text{ Гц}$$



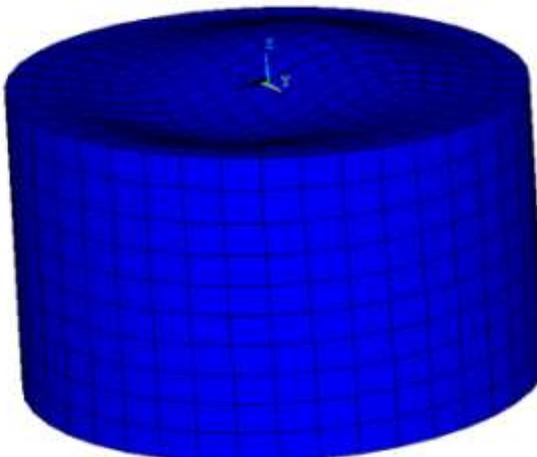
$$f_2 = 0.50 \text{ Гц}$$



$$f_3 = 0.55 \text{ Гц}$$



$$f_4 = 0.57 \text{ Гц}$$

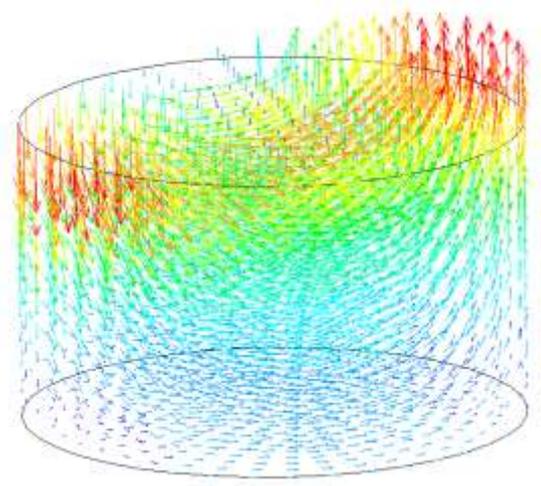


$$f_5 = 0.62 \text{ Гц}$$



$$f_6 = 0.63 \text{ Гц}$$

Исследование зависимости первой собственной частоты от относительной глубины резервуара



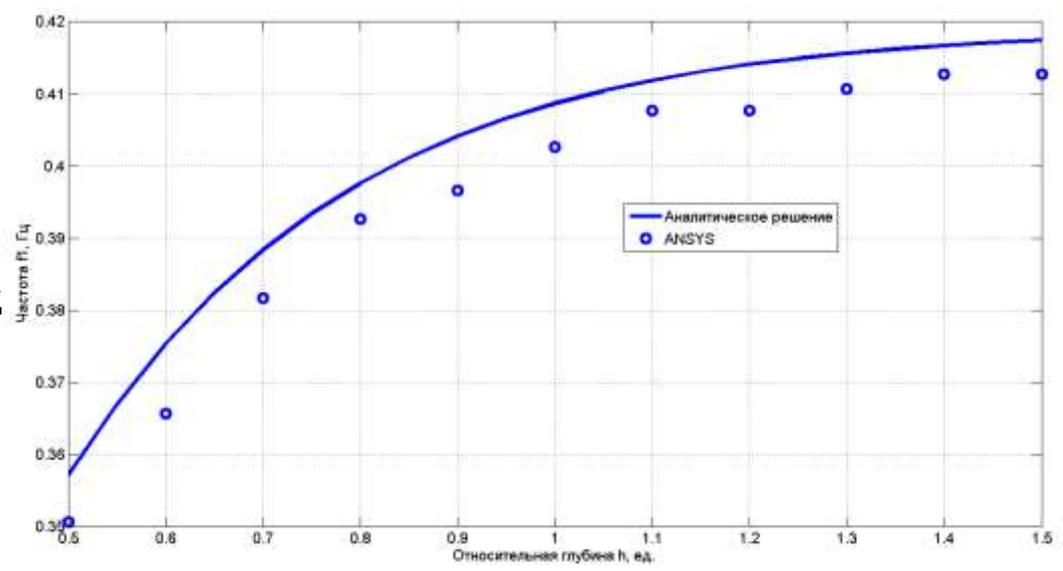
Векторное поле перемещений на первой частоте колебаний жидкости $f_1 = 0.39$ Гц

f_1 , Гц

Аналитическое выражение для первой частоты:

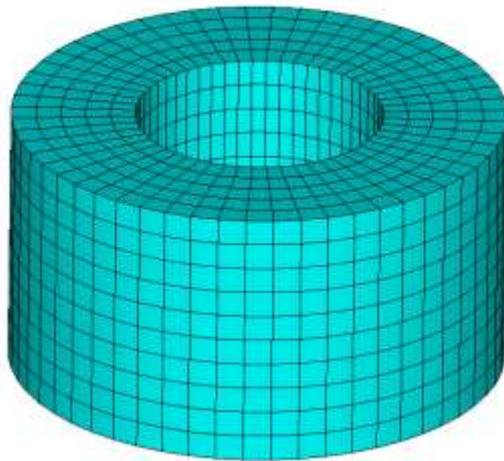
$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.84g}{R} th(1.84\hat{h})}$$

$\hat{h} = h/R$ – относительная глубина резервуара



Относительная глубина резервуара \hat{h}

Определение собственных частот колебаний жидкости для кольцевого резервуара



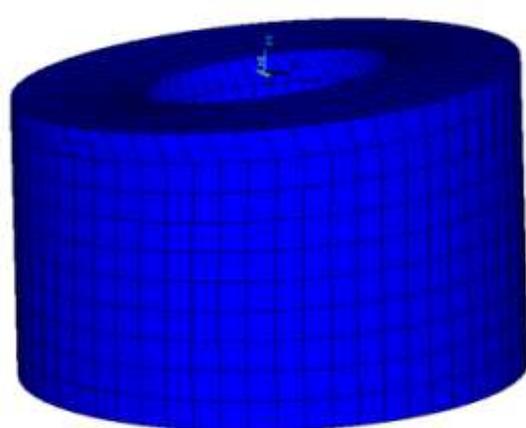
| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Жидкость | Вода при $T = 25^{\circ}\text{C}$ |
| Модуль объемного расширения k , Па | 2.2×10^9 |
| Плотность ρ , кг/м ³ | 998 |
| Динамическая вязкость, Па · с | 8.9×10^{-4} |

Конечно-элементная модель жидкости в кольцевом резервуаре

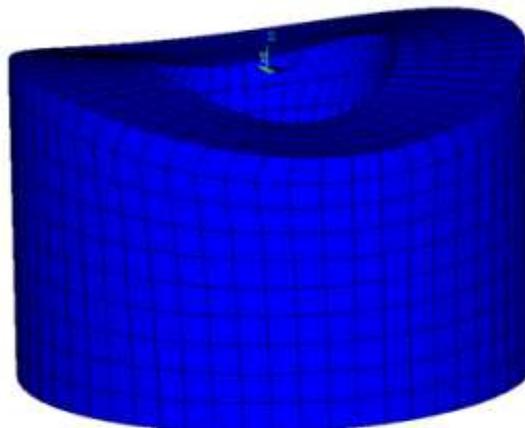
Метод Хаусхолдера нахождения собственных частот (*Reduced mode extraction method*). Главные степени свободы (*Master Degrees of Freedom*) – вертикальные перемещения u_z . В расчете учитывалась сила тяжести.

| | |
|---------------------------------------|---------|
| Тип элемента | FLUID80 |
| Количество узлов N_{NODE} | 3696 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 3080 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 11088 |

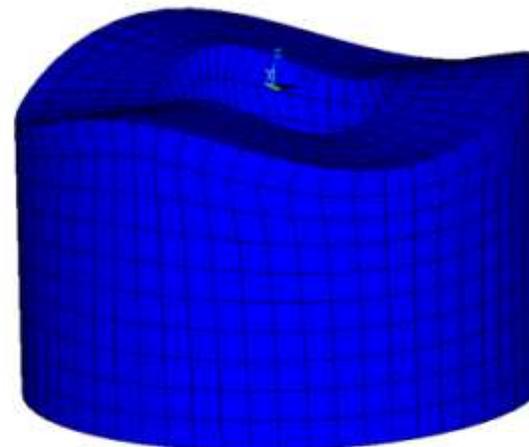
Собственные формы и собственные частоты колебаний жидкости



$$f_1 = 0.33 \text{ Гц}$$



$$f_2 = 0.47 \text{ Гц}$$



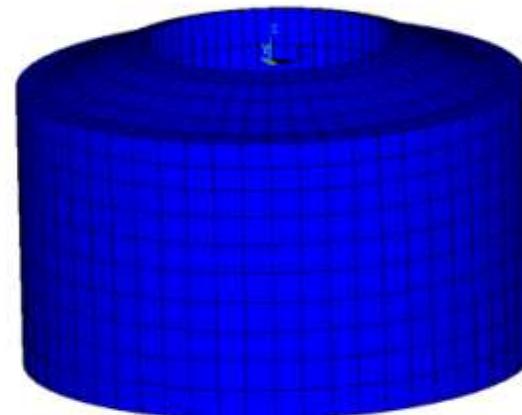
$$f_3 = 0.55 \text{ Гц}$$



$$f_4 = 0.59 \text{ Гц}$$

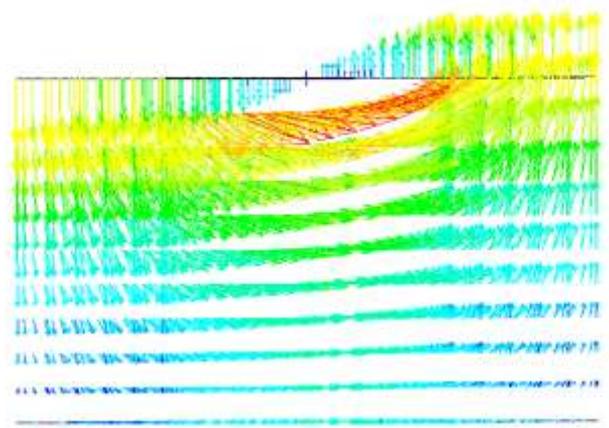


$$f_5 = 0.669 \text{ Гц}$$



$$f_6 = 0.670 \text{ Гц}$$

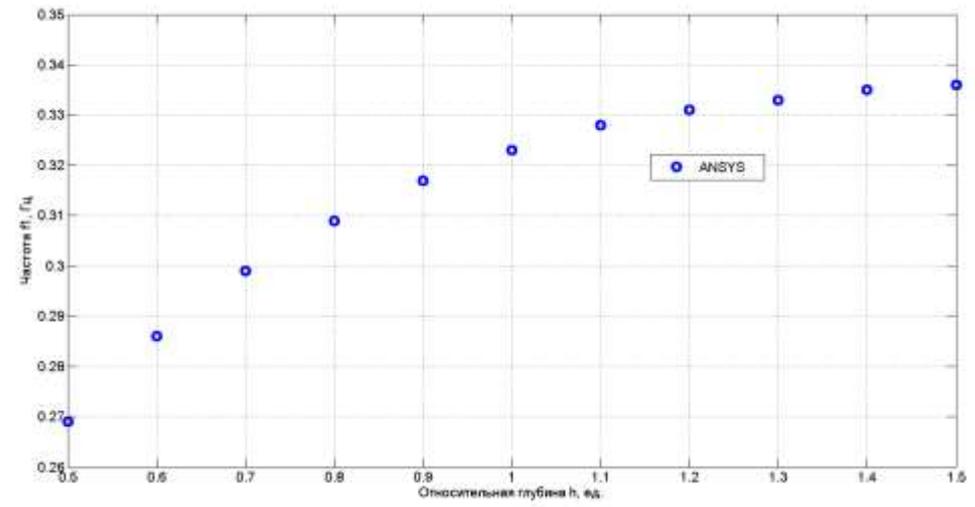
Исследование зависимости первой собственной частоты от относительной глубины резервуара



Векторное поле перемещений на первой частоте колебаний жидкости $f_1 = 0.33$ Гц
 $f_1, \text{ Гц}$

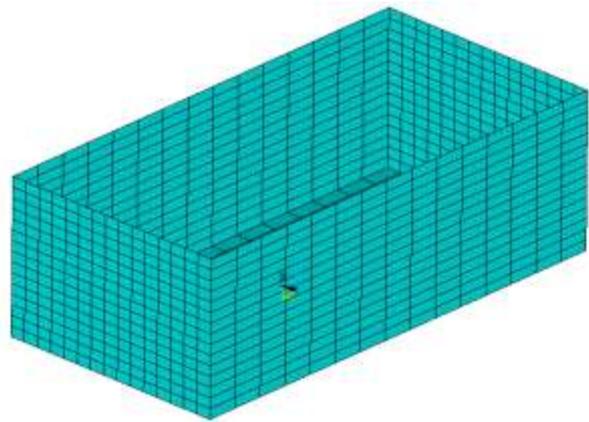
Не существует аналитической оценки для первой собственной частоты

$$R^{out} / R_{int} = 2; \hat{h} = h / R^{out}$$



Относительная глубина резервуара \hat{h}

Расчет резервуаров на сейсмическое воздействие с учетом присоединенных масс жидкости в ANSYS



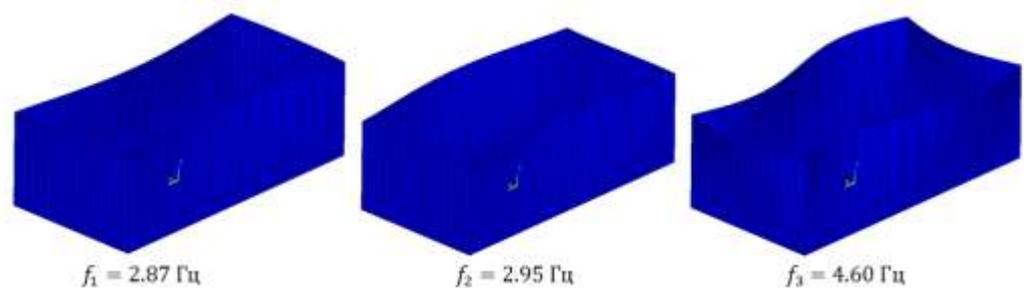
| | |
|----------------------------|--------------------|
| E , Па | 2×10^{11} |
| ρ , кг/м ³ | 7800 |
| Длина l , м | 6 |
| Ширина b , м | 3 |
| Высота h , м | 2 |
| Толщина стенок t , м | 0.01 |

Коэффициент относительного затухания $\zeta = 0.005$

Модальный анализ:

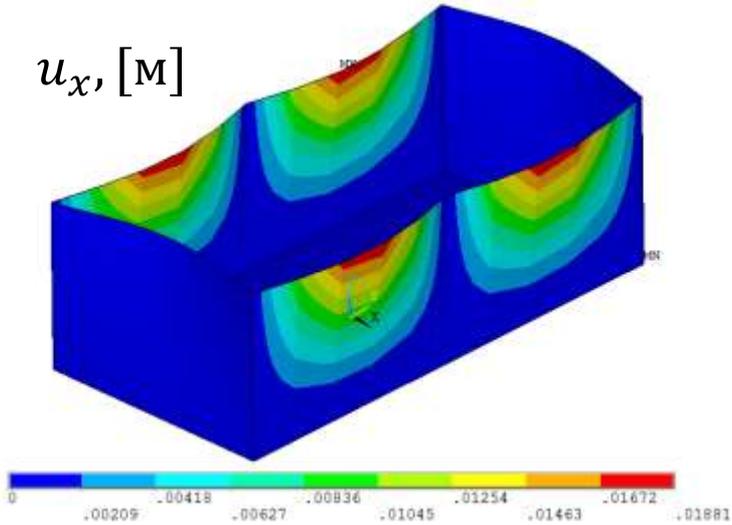
| | |
|------------------------------------------|----------|
| Тип элемента | SHELL181 |
| Количество узлов N_{NODE} | 1156 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 1125 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 6936 |

$f_1 = 2.87$ Гц; $f_{40} = 43.81$ Гц, $f_{УНП} \cong 33$ Гц.

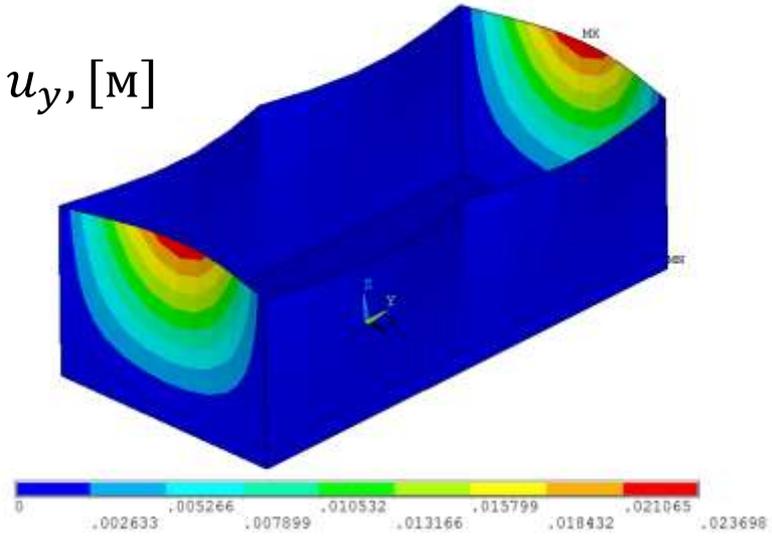


Результаты расчета по линейно-спектральной теории

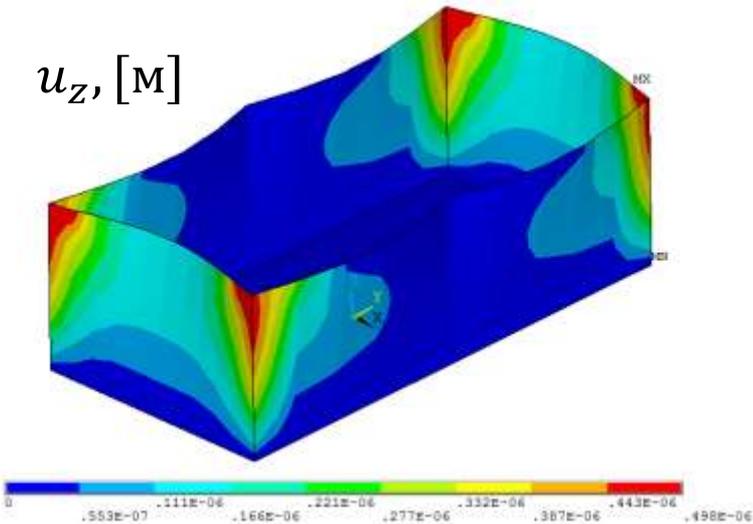
$u_x, [M]$



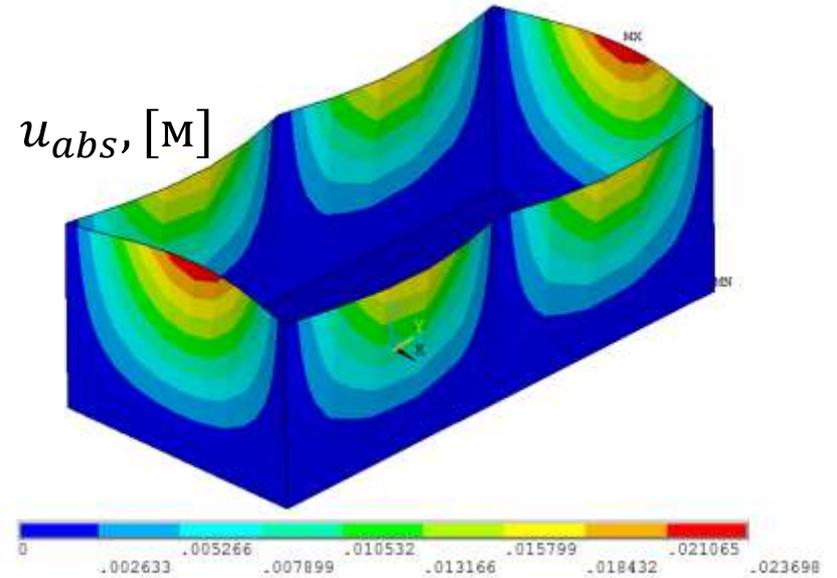
$u_y, [M]$



$u_z, [M]$

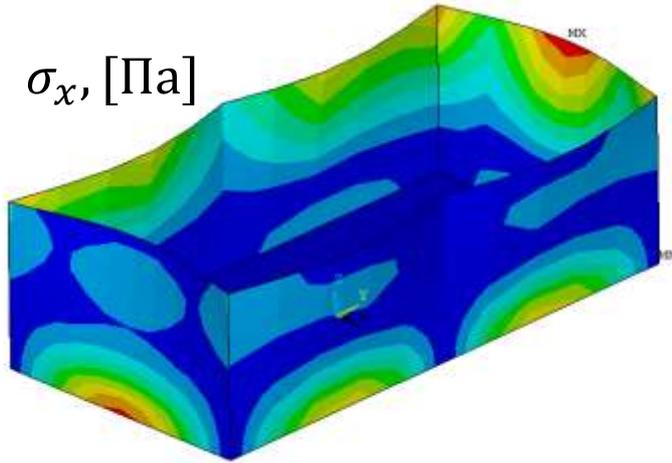


$u_{abs}, [M]$

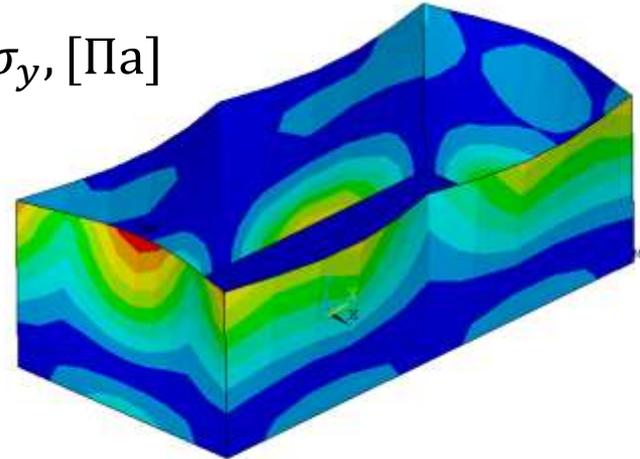


Результаты расчета по линейно-спектральной теории

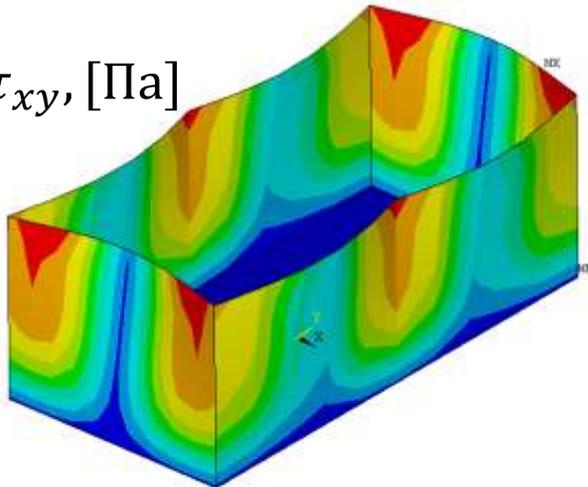
σ_x , [Па]



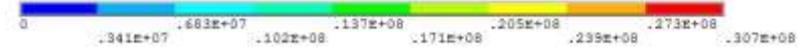
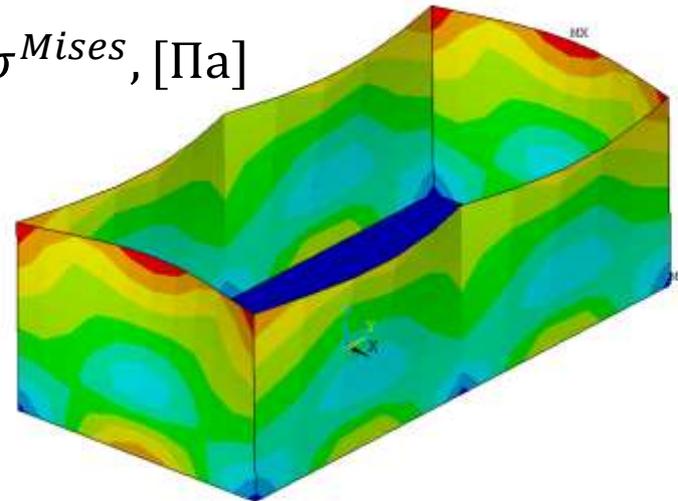
σ_y , [Па]



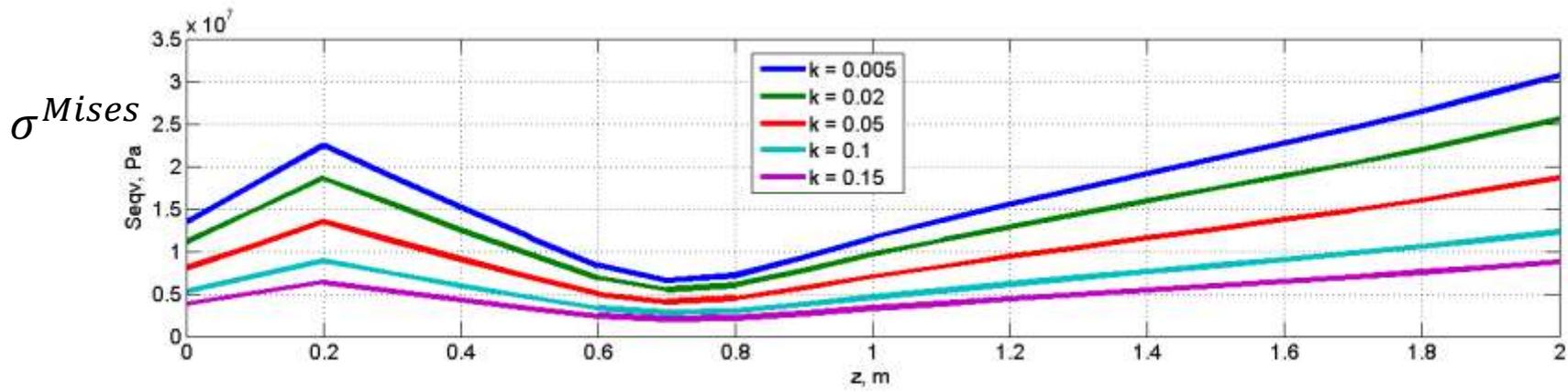
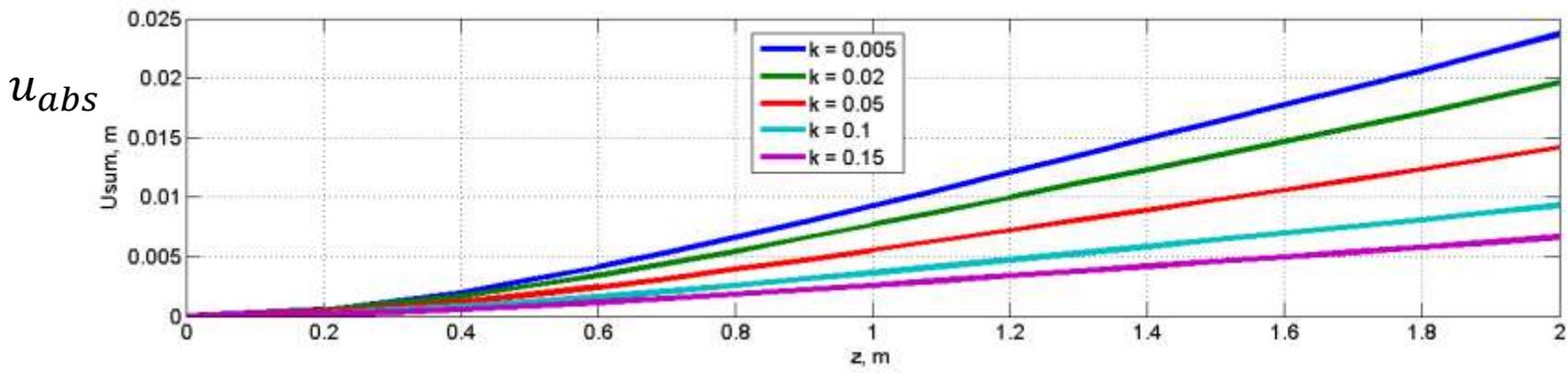
τ_{xy} , [Па]



σ^{Mises} , [Па]

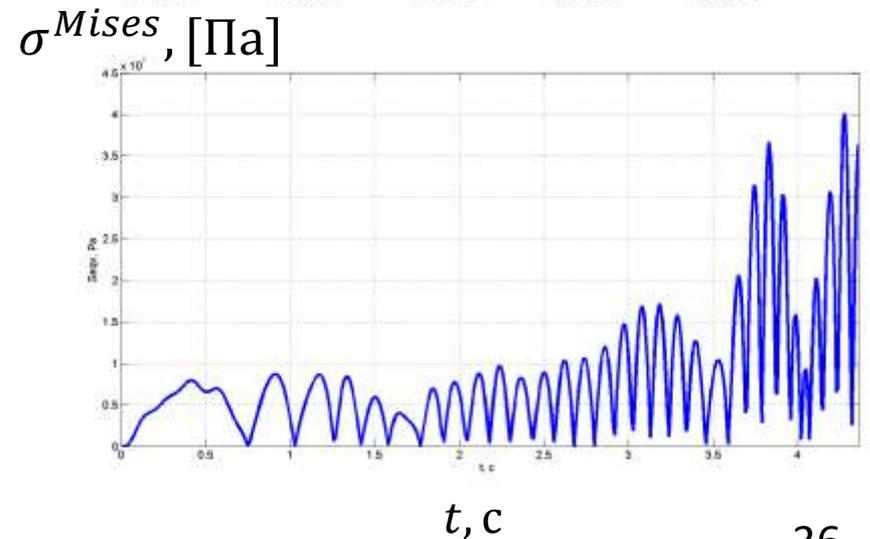
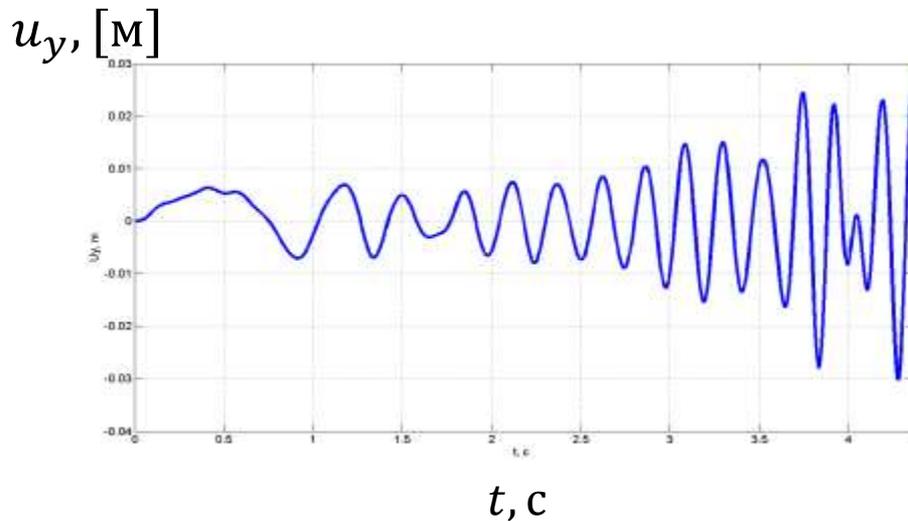
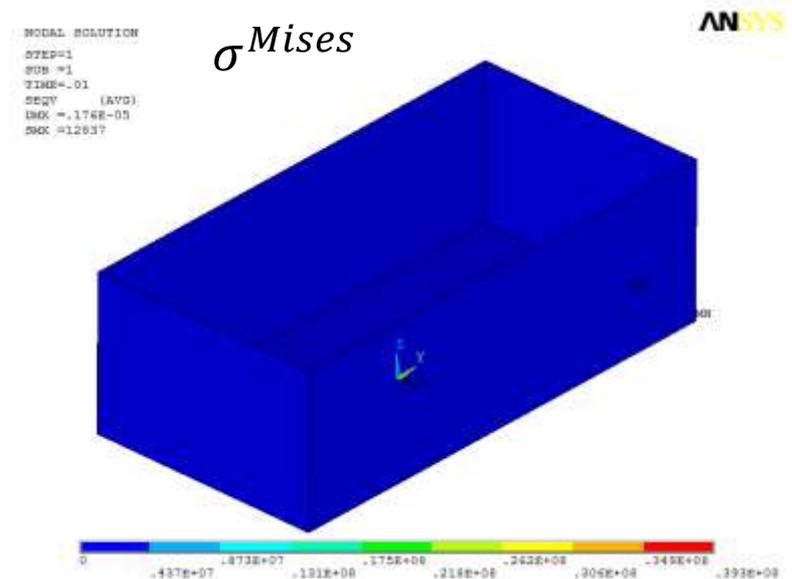
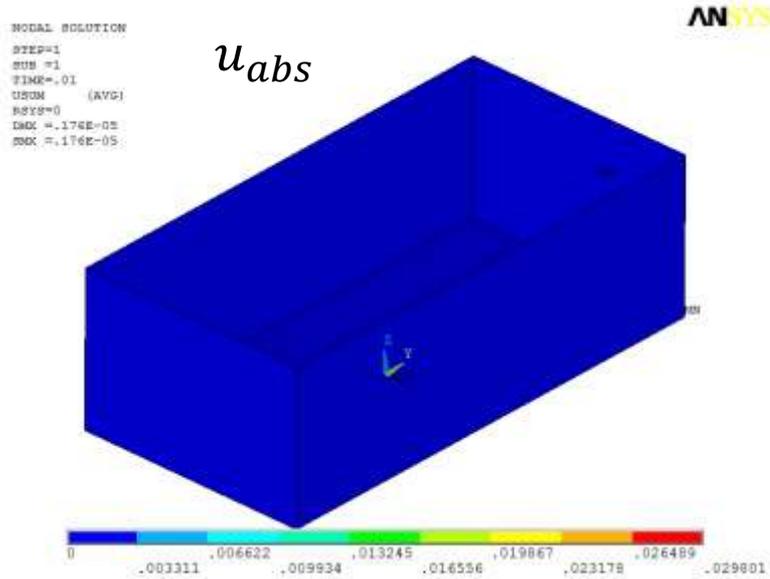


Исследование влияния коэффициентов относительного затухания

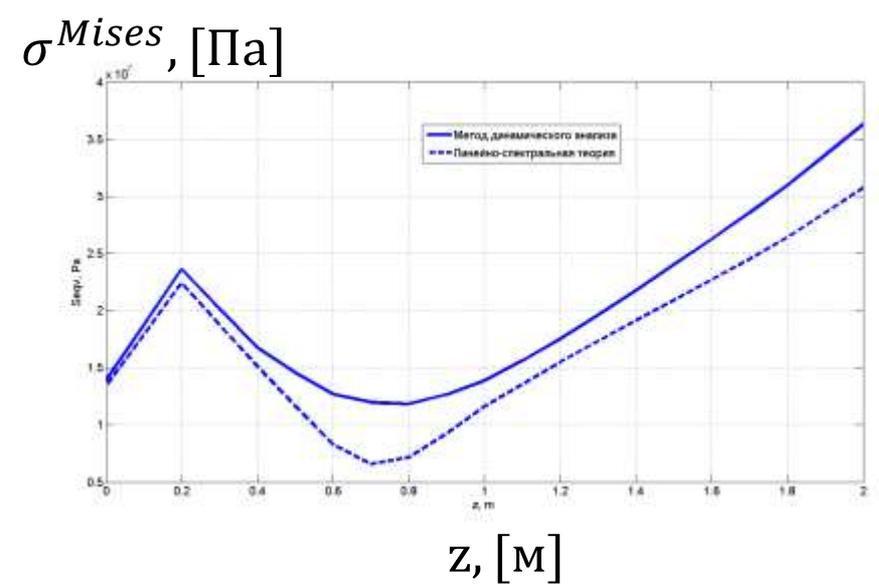
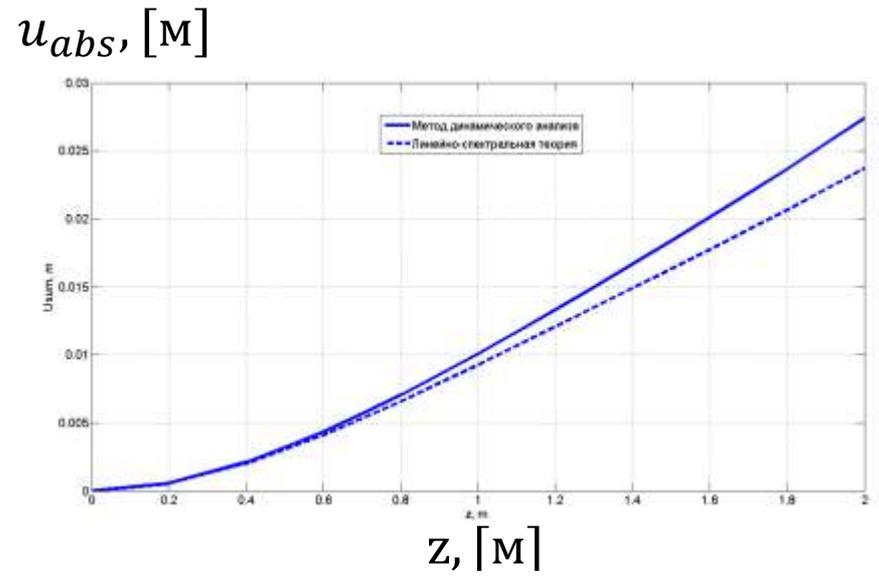


Абсолютные перемещения и эквивалентные напряжения для различных значений коэффициента затухания

Результаты расчета методом динамического анализа



Сравнение результатов расчета по линейно-спектральной теории и методом динамического анализа

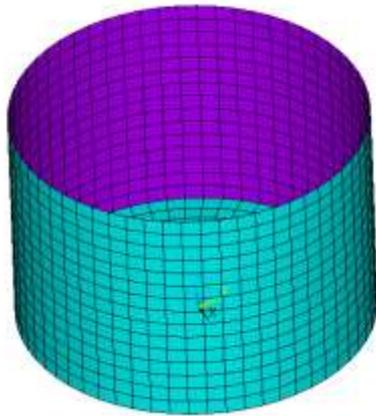


Распределение перемещений u_{abs} вдоль прямой $\{x = 0; y = l/2\}$
 при $t^{кон} = 4.36$ с в сравнении с результатом по ЛСТ

Распределение напряжений σ^{Mises} вдоль прямой $\{x = 0; y = l/2\}$
 при $t^{кон} = 4.36$ с в сравнении с результатом по ЛСТ

Вывод: линейно-спектральная теория сейсмостойкости не даёт запаса при вычислении перемещений и напряжений в прямоугольных резервуарах, если резервуар обладает собственными частотами в области преобладающих частот землетрясения.

Расчет цилиндрического резервуара по линейно-спектральной теории сейсмостойкости



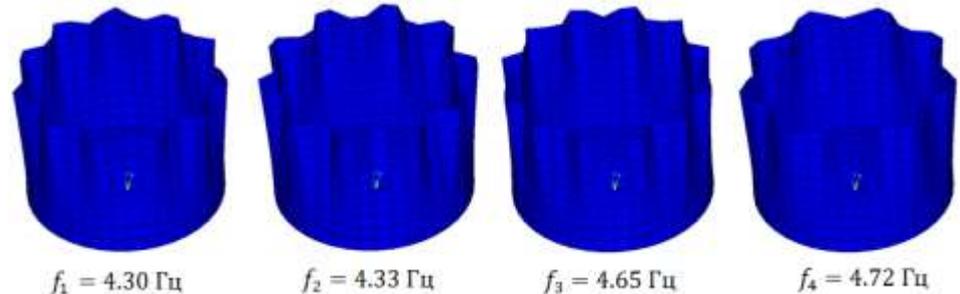
| | |
|----------------------------|--------------------|
| E , Па | 2×10^{11} |
| ρ , кг/м ³ | 7800 |
| Радиус R , м | 4 |
| Высота h , м | 6 |
| Толщина стенок t , м | 0.001 |

Коэффициент относительного затухания $\zeta = 0.005$

| | |
|---------------------------------------|----------|
| Тип элемента | SHELL181 |
| Количество узлов N_{NODE} | 1370 |
| Количество элементов N_{ELEM} | 1340 |
| Количество степеней свободы N_{DOF} | 8220 |

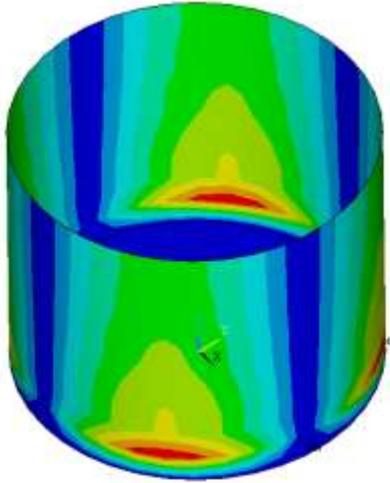
Модальный анализ:

$$f_1 = 4.30 \text{ Гц}; f_{70} = 42.76 \text{ Гц.} \quad f_{УНП} \cong 33 \text{ Гц.}$$

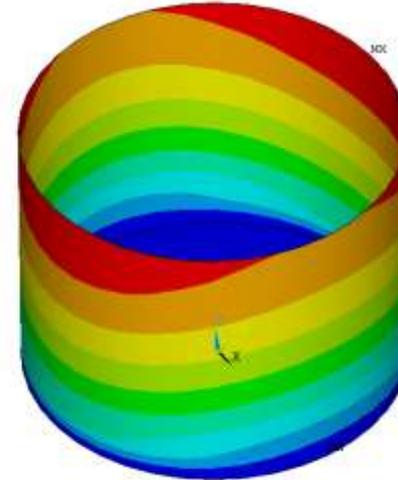


Результаты расчета по линейно-спектральной теории

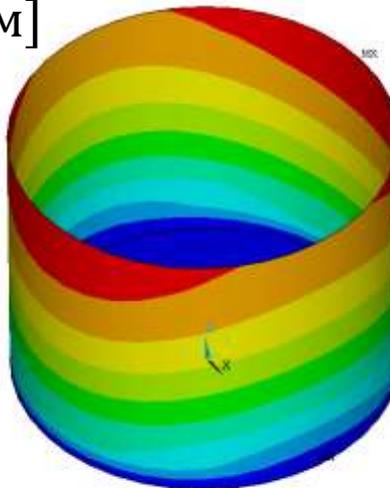
$u_x, [M]$



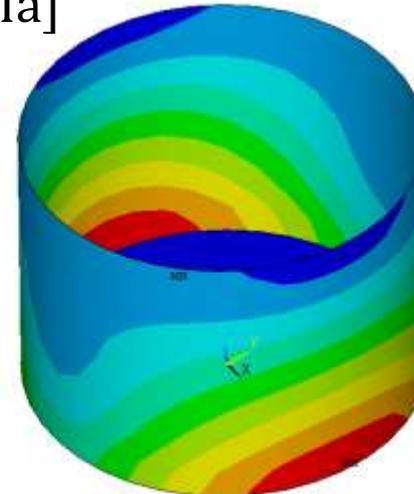
$u_y, [M]$



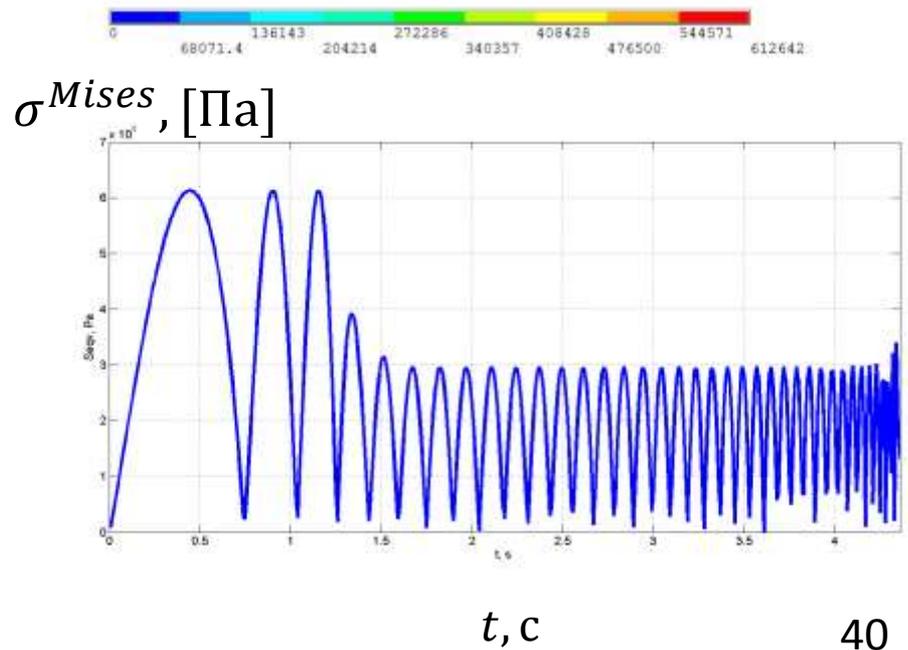
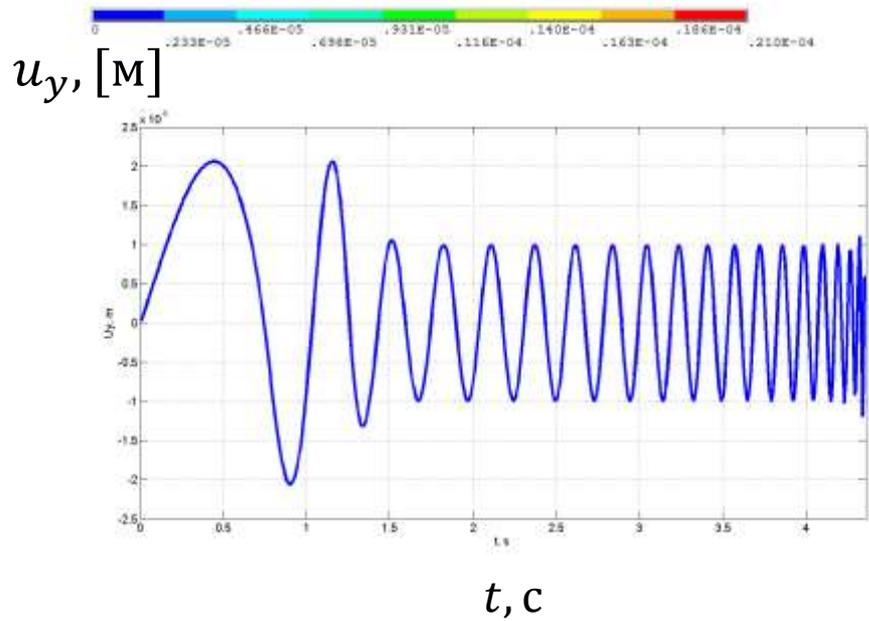
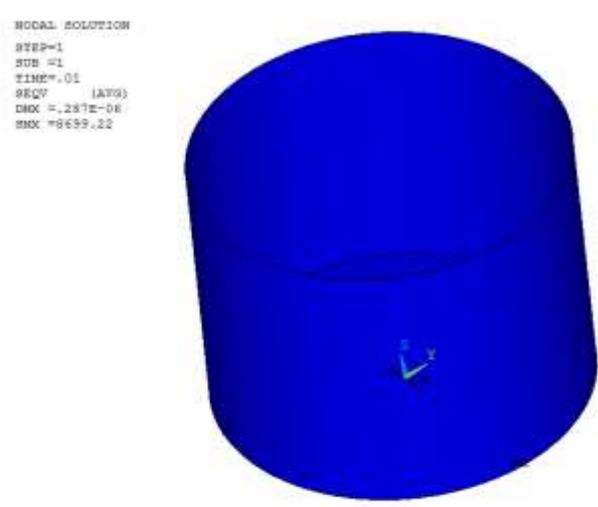
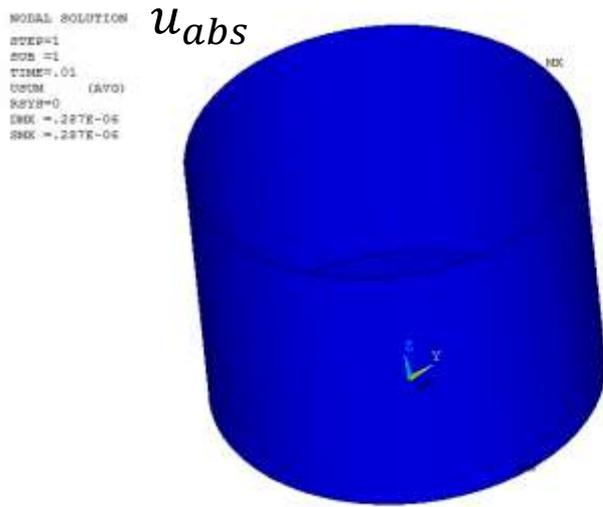
$u_{abs}, [M]$



$\sigma^{Mises}, [Pa]$

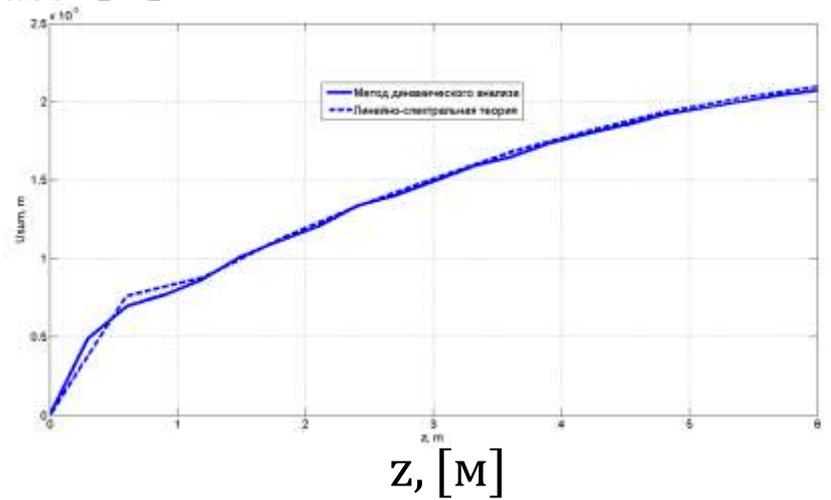


Результаты расчета методом динамического анализа



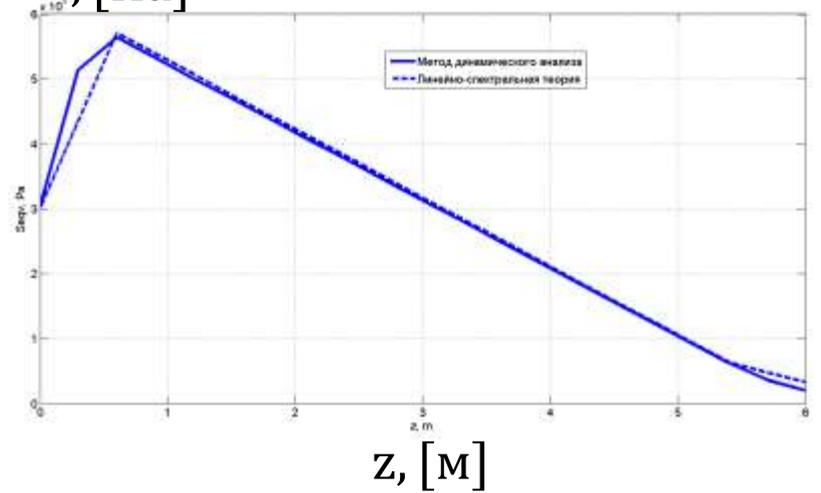
Сравнение результатов расчета по линейно-спектральной теории и методом динамического анализа

$u_{abs}, [M]$



Распределение перемещений u_{sum} вдоль прямой $\{x = 0; y = R\}$ при $t = 0.48$ с в сравнении с результатом по ЛСТ

$\sigma^{Mises}, [Pa]$



Распределение напряжений σ^{Mises} вдоль прямой $\{x = R; y = 0\}$ при $t = 0.48$ с в сравнении с результатом по ЛСТ

Вывод: при расчете цилиндрических резервуаров на сейсмическое воздействие необходимо наряду с линейно-спектральным методом проводить и динамический анализ, в случае если одна или несколько собственных частот резервуара ниже $f_{унп} \cong 33$ Гц – «частоты нулевого периода».



Заключение

- Изучены общие принципы расчета на сейсмостойкость и способы задания исходной сейсмологической информации
- Рассмотрены способы учета влияния жидкости на колебания конструкций
- Сравнительный анализ методов расчета на сейсмостойкость для балки, а также резервуаров различной формы, показал, что наряду с расчетом по линейно-спектральной теории необходим динамический анализ конструкций (прежде всего, сооружений и элементов АЭС)
- Направление дальнейших исследований: решение динамической связанной задачи гидроупругости при расчете резервуаров с жидкостью на сейсмическое воздействие