



Скорук Л.Н., к.т.н.

**Моделирование и расчет вертикальных цилиндрических резервуаров
на действие сейсмических нагрузок на примере резервуара $V=3000 \text{ м}^3$**



Исходные данные для расчета резервуара РВС-3000

№ п/п	Наименование	Един. изм.	Значение
1	Тип резервуара	—	вертикальный, цилиндрический, без крышки
2	Высота резервуара	м	12
3	Радиус резервуара, R	м	9
4	Емкость	м ³	3 000
5	Количество поясов по высоте	шт.	8
6	Высота пояса	м	1,5
7	Толщина поясов по высоте	мм	8-12 мм
8	Толщина окрайки дна	мм	8
9	Толщина центральной части дна	мм	6
10	Тип фундамента	—	железобетонный кольцевой, 2000x900 (h)

11	Расчетная глубина заполнения резервуара жидкостью	м	11,5
12	Плотность жидкости наполнения,	кг/м ³	1 000
13	Расчетная сейсмичность площадки строительства	бал	7
14	Расчетная снеговая нагрузка	кг/м ²	100
15	Расчетная ветровая нагрузка	кг/м ²	53,4
16	I– IV пояс (сталь 09Г2С) V– VIII пояс (сталь Ст3сп5)	кг/см ²	3200 2450
17	Количество анкеров	шт.	11

Согласно [12] коэффициент постели при существующих грунтах в расчетной схеме принят $4 \text{ кг/см}^3 = 4\,000 \text{ т/м}^3$.



• Методика и особенности расчета резервуара

В качестве основного метода сейсмических расчетов сооружений в нормах [2] принята линейно-спектральная теория сейсмостойкости.



- при землетрясении происходят совместные колебания резервуара с жидкостью;
- наличие жидкости приводит к изменению собственных частот и форм конструкции по сравнению с колебаниями в пустоте, дополнительному гидродинамическому давлению на стенки и дно резервуара;
- для тонкостенных резервуаров гидродинамический расчет может оказаться основным, поскольку масса заполняющей жидкости значительно превосходит массу самого резервуара;
- в некоторых случаях необходимо также оценить высоту возникающей при колебаниях поверхностной волны (во избежание выплеска из резервуара, удара в крышку, обнажения погруженных в жидкость элементов оборудования и т.п.).

• Определение нагрузки на резервуар

Давление на вертикальные стенки при горизонтальном сейсмическом воздействии распределяется по закону:

$$p_x^{(x)}(z_0, h_0, \Theta) = \rho g A_{\max}^{(x)} k_4(z_0, h_0) \sin \Theta$$

где

Θ – угол, отсчитываемый от плоскости, перпендикулярной направлению ускорения;

$z_0 = \frac{z}{h}, h_0 = \frac{h}{R}$ – безразмерные параметры;

h – глубина жидкости в резервуаре;

z – рассматриваемый уровень;

$k_4(z_0, h_0)$ – эпюра гидродинамического давления:

$$k_4(z_0, h_0) = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{ch(k_n z_0 h_0)}{(k_n^2 - 1) ch(k_n h_0)}$$

k_n – коэффициенты, равные: $k_1 = 1,84$; $k_2 = 5,33$; $k_3 = 8,53$; $k_4 = 11,71$; $k_5 = 14,86$;

$k_{5+n} = k_5 + \pi n$ ($n = 1, 2, \dots$).

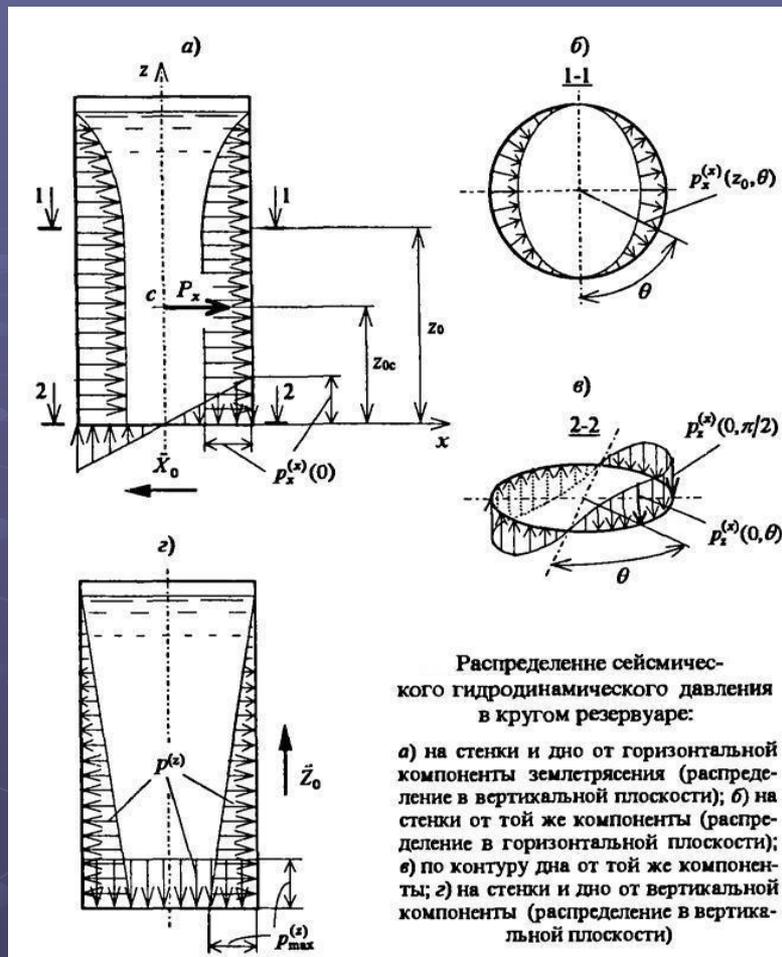
При вертикальном сейсмическом воздействии

гидродинамическое давление распределено по стенкам линейно, по дну равномерно. Его максимальное значение (у дна):

$$p_{\max}^{(z)} = \rho g A_{\max}^{(z)} h$$

В соответствии с расчетной сейсмичностью 7 баллов принимаются пиковые значения ускорений основания равное (в долях) –

$$A_{\max}^{(x)} = 0,1 \quad A_{\max}^{(z)} = 0,7 A_{\max}^{(x)}$$



• Определение нагрузки на резервуар

Равнодействующая горизонтального гидродинамического давления:

$$P_x = gm_{\alpha} A_{\max}^{(x)} k_5$$

где m_{α} – полная масса жидкости в резервуаре.

Безразмерная координата ее приложения:

$$z_{0c} = \frac{h_{0c}}{h} = k_6$$

Полная масса жидкости в резервуаре:

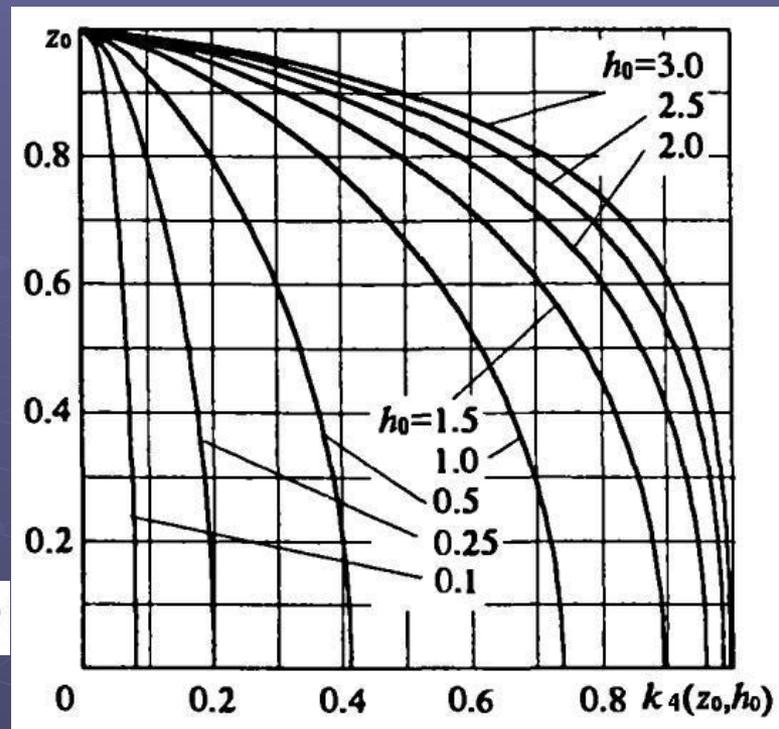
$$m_{\text{ж}} = \pi r^2 h \rho = 3,14 \times 9^2 \times 11,5 \times 1000 = 2\,926\,394 \text{ кг} = 2\,926 \text{ т}$$

Равнодействующая горизонтального гидродинамического давления:

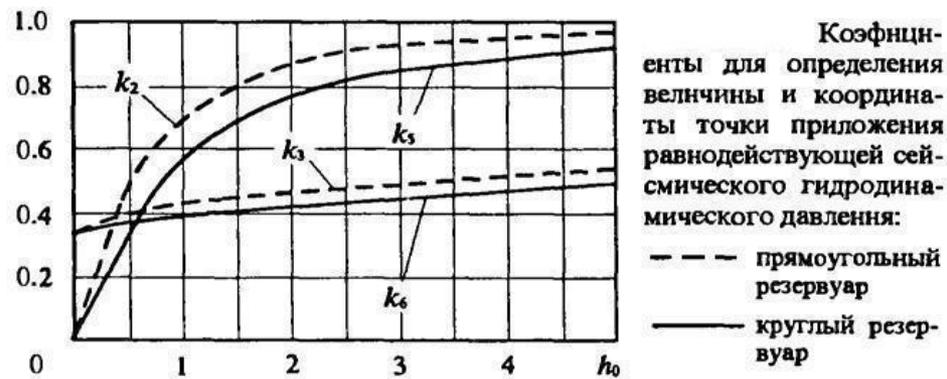
$$P_x = gm_{\text{ж}} A_{\max}^{(x)} k_5 = 9,8 \times 2\,926 \times 0,1 \times 0,65 = 1\,864\,113 \text{ Н} \approx 190 \text{ т.}$$

Координата ее приложения:

$$h_{0c} = k_6 h = 0,4 \times 11,5 = 4,6 \text{ м}$$



Форма эпюры сейсмического гидродинамического давления в резервуаре при горизонтальном сейсме



• Определение высоты волны у стенки резервуара

Максимальная высота волны (у стенки):

$$d_{\max} = \frac{2R}{g} A_{\max}^{(x)} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{[S_{ax}(\omega_n)]^2}{(k_n^2 - 1)^2}}$$

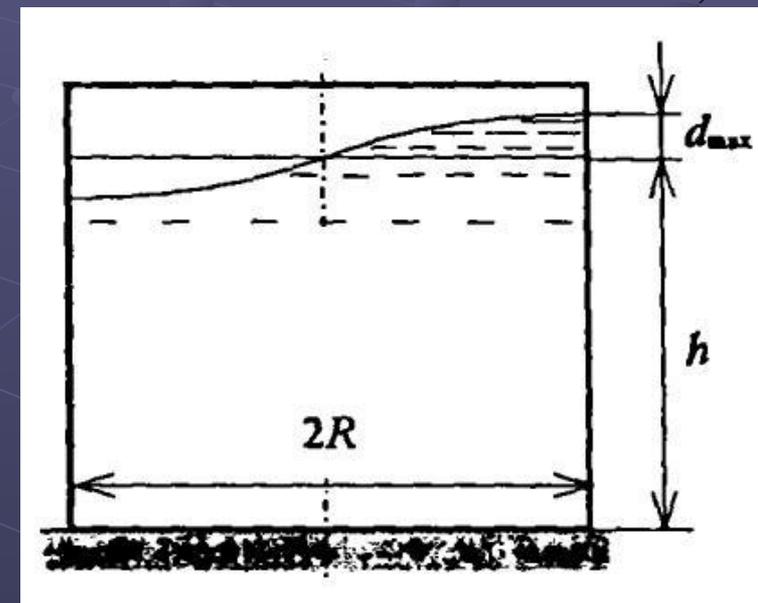
где $S_{ax}(\omega_n)$ – значение спектра ускорений, соответствующее n-й круговой частоте свободных колебаний жидкости:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{gk_n}{R} th(k_n h_0)}$$

В нашем случае с учетом пяти членов ряда высота волны будет:

$$d_{\max} = 1,05 + 0,158 + 0,076 + 0,047 + 0,033 = 1,364 \text{ м}$$

Таким образом, глубина жидкости в резервуаре должна быть ниже верхней кромки не менее чем 1,4 м и составлять в данном случае не более $h = 10,6$ м.



• Определение нагрузки на резервуар

Задание нагрузки

В расчетах использовались следующие группы нагрузок:

№	Группы нагрузок	Значение нормативной нагрузки
1	Собственный вес конструкции с обслуживающей площадкой (днище + стенки + фундамент)	Собирается автоматически
2	Статическая нагрузка от веса воды полного резервуара	0 – 11,5 т/м ²
3	Снег на обслуживающей площадке	100 кг/м ²
4	Давление ветра на стенки резервуара по X	53,4 кг/м ²
5	Сейсмическое колебание вдоль оси X	
6	Сейсмическое колебание вдоль оси Z	

На основании групп нагрузок были сформированы следующие загрузки и их комбинации.

Загрузки:	
L1	Постоянная нагрузка
L2	Вода статика
L3	Снег
L4	Ветер
L5	Сейсмика по X
L6	Сейсмика по Z

Комбинации загрузок:	
№1	1,0*(L1)+1,0*(L2)+1,0*(L3)+1,0*(L4)
№2	1,0*(L1)+1,0*(L2)+1,0*(L3)+1,0*(L4)+1,0*(L5)
№3	1,0*(L1)+1,0*(L2)+1,0*(L3)+1,0*(L4)+1,0*(L6)

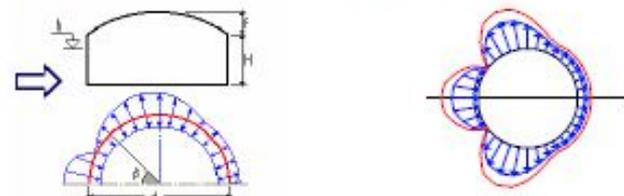
Сочетания нагрузок.

В соответствии с требованиями СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» сформировано основное сочетание нагрузок, которое использовано для определения нагрузок на фундаменты и проверки сечений металлопроката.

Ном. загр.	Вид загрузки	Взаимноисключающ. нагрузки	Козф. надежности по нагрузке	Кэффициенты
1	Постоянное	0 0	1,1	1,0 1,0 0,9
2	Постоянное	0 0	1,1	1,0 1,0 0,9
3	Кратковременное	0 0	1,4	1,0 0,9 0,5
4	Кратковременное	0 0	1,4	1,0 0,9 0,5
5	Сейсмическое	1 0	1,0	0,0 0,0 1,0
6	Сейсмическое	1 0	1,0	0,0 0,0 1,0

Ветровая нагрузка Расчет выполнен по нормам проектирования "СНиП 2.01.07-85" с изменением №2"

Исходные данные	
Нормативное значение ветрового давления	0,038 Тл/м ²
Тип местности	A - открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра
Тип сооружения	Цилиндрические резервуары



Параметры	
Поверхность	Стена (в плане)
Шаг сканирования	10 град
Коэффициент надежности по нагрузке γ	1,4
h	12 м
d	18 м
r	0 м
b	10 м

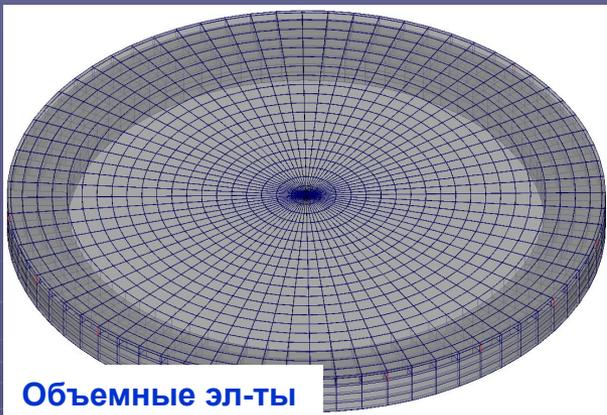
Угол (град)	Нормативное значение (Тл/м ²)	Расчетное значение (Тл/м ²)
0	0,038	0,053
10	0,038	0,051
20	0,027	0,037
30	0,018	0,021
40	-0,008	-0,007
50	-0,024	-0,034
60	-0,04	-0,056
70	-0,048	-0,063
80	-0,044	-0,061
90	-0,038	-0,049
100	-0,024	-0,034
110	-0,016	-0,022
120	-0,012	-0,017
130	-0,014	-0,02
140	-0,014	-0,02
150	-0,014	-0,02
160	-0,014	-0,02
170	-0,014	-0,02
180	-0,014	-0,02
190	-0,014	-0,02
200	-0,014	-0,02
210	-0,014	-0,02
220	-0,014	-0,02
230	-0,014	-0,02
240	-0,013	-0,017
250	-0,016	-0,022
260	-0,024	-0,034
270	-0,038	-0,049
280	-0,044	-0,061
290	-0,048	-0,063
300	-0,04	-0,056
310	-0,024	-0,034
320	-0,008	-0,007
330	0,018	0,021
340	0,027	0,037
350	0,038	0,051
360	0,038	0,053

Счет производился программой ReCl, версия 11.3.1.1 от 23.02.2011

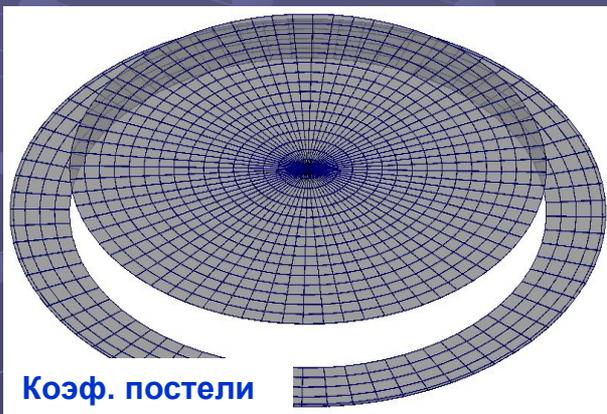
Ввиду вышеуказанного задания нагрузки, расчет производился в линейной постановке!!!



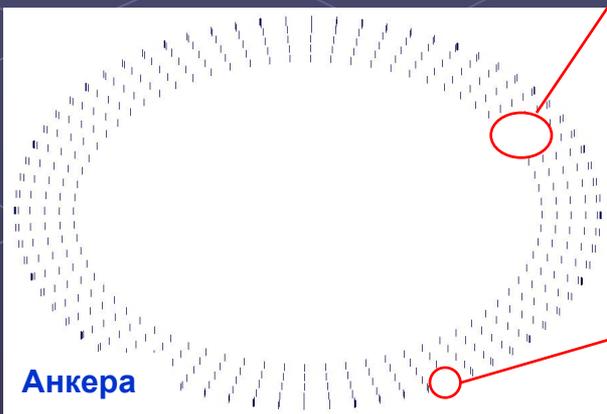
Расчетная схема днища резервуара и загрузки



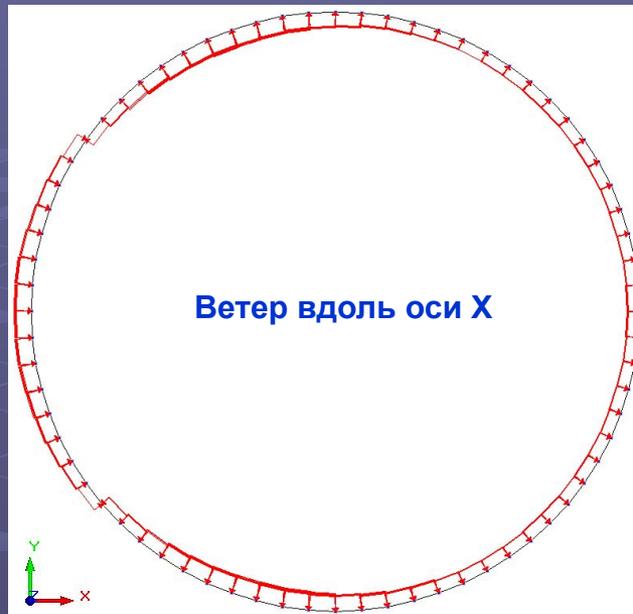
Объемные эл-ты



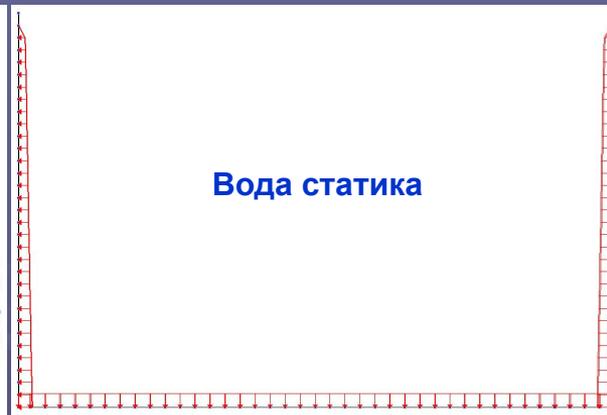
Коэф. постели



Анкера



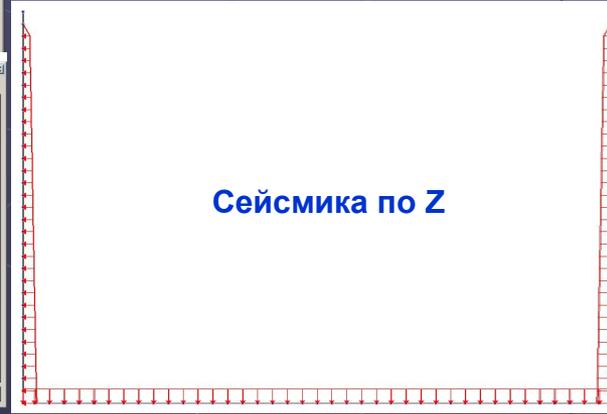
Ветер вдоль оси X



Вода статика



Сейсмика по X



Сейсмика по Z

Односторонние связи

Вид связи

- Одноузловая связь
- Двухузловая связь

Характеристики исходного состояния

- Зазор: 0 м
- Натяг
 - Усилие преднапряжения
 - Начальное смещение

Р = _____ Т

Характеристики связи

Связь отключается при:

- сжатии
- растяжении

Жесткость: 320850 Т

Направление связи

- Вдоль оси X Y
- Произвольно

X: 0 Y: 0 Z: -1

OK

Местности стержневых элементов

Общие данные | Параметрические сечения

Материал: _____

Объемный вес: 7.85 т/м³

Модуль упругости: 2.1e+007 т/м²

Коэффициент Пуассона: 0.3

Сварг

Число стержней: 1

Номер типа жесткости: 15

Сечение: _____

Параметры сечения: D: 36 см, d: 0.01 см

Выбранный диаметр

Толщина стержня

Характеристики сечения: _____

Контроль: _____

Закончить и выйти | Закончить и проанализировать | ОК | Отмена | Справка



Задание нагрузки на стенки резервуара

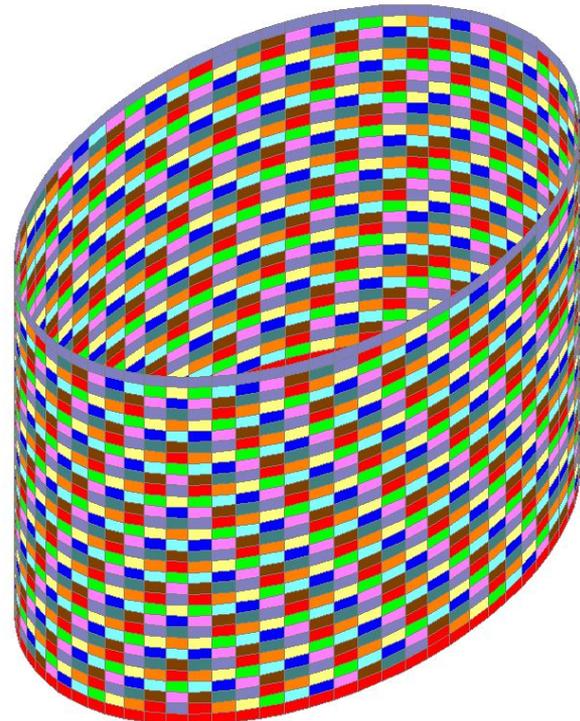
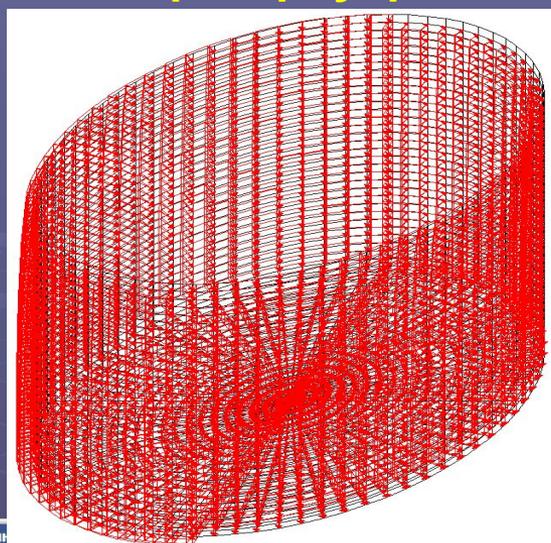
Условие	z	h0	h4	к3	Темпер.	Рн	к3	Длина	h0
1	0,1875	0,016584	0,04427	1	3	0,396332	1	0,396332	0,000000
2	0,39375	0,033168	0,08854	2	1,5	0,989454	2	1,5	0,000000
3	0,590625	0,049752	0,13281	3	11,5	0,839903	3	0,396989	110
4	0,7875	0,066336	0,177075	4	17,5	0,777191	4	0,396989	110
5	0,984375	0,08292	0,22134	5	22,5	0,760001	5	0,317966	110
6	1,18125	0,099504	0,26561	6	27,5	0,742811	6	0,247248	110
7	1,378125	0,116088	0,309875	7	32,5	0,725621	7	0,247248	110
8	1,575	0,132672	0,35414	8	37,5	0,708431	8	0,257916	110
9	1,771875	0,149256	0,398405	9	42,5	0,691241	9	0,257916	110
10	1,96875	0,16584	0,44267	10	47,5	0,674051	10	0,217983	110

Excel

Word

Текстовый файл

SCAD



Карта распределенных н...

Вкл

- 0,4
- 0,38
- 0,36
- 0,34
- 0,32
- 0,3
- 0,28
- 0,26
- 0,24
- 0,22
- 0,2
- 0,18
- 0,16
- 0,14
- 0,12
- 0,1
- 0,08
- 0,06
- 0,04
- 0,02

Применить Фрагментировать

Закреть

Structure CAD (Резервуар-екр-2) (I:\Sdata-2011\Барвин

Проект Опции Справка

Новый проект

Открыть проект

Прочитать проект из текстового формата

Прочитать проект из текстового формата(предыдущие версии)

Импорт

Экспорт

Сохранить проект

Сохранить проект как...

Сохранить данные в виде текста

Закреть проект

Комментарии к проекту

Переслать...

Выход

Резервуар-Стенка-задание нагрузки.TXT - Блокнот

```

6 3 0,792664:1 /
6 3 0,753031:2 /
6 3 0,713397:3 /
6 3 0,673764:4 /
6 3 0,634131:5 /
6 3 0,594498:6 /
6 3 0,554865:7 /
6 3 0,515231:8 /
6 3 0,475598:9 /
6 3 0,435965:10 /
6 3 0,396332:11 /
6 3 0,356699:12 /
6 3 0,317066:13 /
6 3 0,277432:14 /
6 3 0,237799:15 /
6 3 0,198166:16 /
6 3 0,158533:17 /
6 3 0,118919:18 /
6 3 0,079266:19 /
6 3 0,039633:20 /
6 3 1,976908:21 /
6 3 1,878063:22 /
6 3 1,779218:23 /
6 3 1,680373:24 /
6 3 1,581528:25 /
6 3 1,482683:26 /
6 3 1,383838:27 /
6 3 1,284993:28 /
6 3 1,186148:29 /
6 3 1,087303:30 /
6 3 0,988458:31 /
6 3 0,889613:32 /
6 3 0,790768:33 /
6 3 0,691923:34 /
6 3 0,593078:35 /
6 3 0,494233:36 /
6 3 0,395388:37 /
6 3 0,296543:38 /
6 3 0,197698:39 /
6 3 0,098853:40 /
6 3 0,000000:41 /
6 3 0,000000:42 /
6 3 0,000000:43 /
6 3 0,000000:44 /
6 3 0,000000:45 /
6 3 0,000000:46 /
6 3 0,000000:47 /
6 3 0,000000:48 /
6 3 0,000000:49 /
6 3 0,000000:50 /
6 3 0,000000:51 /
6 3 0,000000:52 /
6 3 0,000000:53 /
6 3 0,000000:54 /
6 3 0,000000:55 /
6 3 0,000000:56 /
6 3 0,000000:57 /
6 3 0,000000:58 /
6 3 0,000000:59 /
6 3 0,000000:60 /
6 3 0,000000:61 /
6 3 0,000000:62 /
6 3 0,000000:63 /
6 3 0,000000:64 /
6 3 0,000000:65 /
6 3 0,000000:66 /
6 3 0,000000:67 /
6 3 0,000000:68 /
6 3 0,000000:69 /
6 3 0,000000:70 /
6 3 0,000000:71 /
6 3 0,000000:72 /
6 3 0,000000:73 /
6 3 0,000000:74 /
6 3 0,000000:75 /
6 3 0,000000:76 /
6 3 0,000000:77 /
6 3 0,000000:78 /
6 3 0,000000:79 /
6 3 0,000000:80 /
6 3 0,000000:81 /
6 3 0,000000:82 /
6 3 0,000000:83 /
6 3 0,000000:84 /
6 3 0,000000:85 /
6 3 0,000000:86 /
6 3 0,000000:87 /
6 3 0,000000:88 /
6 3 0,000000:89 /
6 3 0,000000:90 /
6 3 0,000000:91 /
6 3 0,000000:92 /
6 3 0,000000:93 /
6 3 0,000000:94 /
6 3 0,000000:95 /
6 3 0,000000:96 /
6 3 0,000000:97 /
6 3 0,000000:98 /
6 3 0,000000:99 /
6 3 0,000000:100 /
6 3 0,000000:101 /
6 3 0,000000:102 /
6 3 0,000000:103 /
6 3 0,000000:104 /
6 3 0,000000:105 /
6 3 0,000000:106 /
6 3 0,000000:107 /
6 3 0,000000:108 /
6 3 0,000000:109 /
6 3 0,000000:110 /
6 3 0,000000:111 /
6 3 0,000000:112 /
6 3 0,000000:113 /
6 3 0,000000:114 /
6 3 0,000000:115 /
6 3 0,000000:116 /
6 3 0,000000:117 /
6 3 0,000000:118 /
6 3 0,000000:119 /
6 3 0,000000:120 /
6 3 0,000000:121 /
6 3 0,000000:122 /
6 3 0,000000:123 /
6 3 0,000000:124 /
6 3 0,000000:125 /
6 3 0,000000:126 /
6 3 0,000000:127 /
6 3 0,000000:128 /
6 3 0,000000:129 /
6 3 0,000000:130 /
6 3 0,000000:131 /
6 3 0,000000:132 /
6 3 0,000000:133 /
6 3 0,000000:134 /
6 3 0,000000:135 /
6 3 0,000000:136 /
6 3 0,000000:137 /
6 3 0,000000:138 /
6 3 0,000000:139 /
6 3 0,000000:140 /
6 3 0,000000:141 /
6 3 0,000000:142 /
6 3 0,000000:143 /
6 3 0,000000:144 /
6 3 0,000000:145 /
6 3 0,000000:146 /
6 3 0,000000:147 /
6 3 0,000000:148 /
6 3 0,000000:149 /
6 3 0,000000:150 /
6 3 0,000000:151 /
6 3 0,000000:152 /
6 3 0,000000:153 /
6 3 0,000000:154 /
6 3 0,000000:155 /
6 3 0,000000:156 /
6 3 0,000000:157 /
6 3 0,000000:158 /
6 3 0,000000:159 /
6 3 0,000000:160 /
6 3 0,000000:161 /
6 3 0,000000:162 /
6 3 0,000000:163 /
6 3 0,000000:164 /
6 3 0,000000:165 /
6 3 0,000000:166 /
6 3 0,000000:167 /
6 3 0,000000:168 /
6 3 0,000000:169 /
6 3 0,000000:170 /
6 3 0,000000:171 /
6 3 0,000000:172 /
6 3 0,000000:173 /
6 3 0,000000:174 /
6 3 0,000000:175 /
6 3 0,000000:176 /
6 3 0,000000:177 /
6 3 0,000000:178 /
6 3 0,000000:179 /
6 3 0,000000:180 /
6 3 0,000000:181 /
6 3 0,000000:182 /
6 3 0,000000:183 /
6 3 0,000000:184 /
6 3 0,000000:185 /
6 3 0,000000:186 /
6 3 0,000000:187 /
6 3 0,000000:188 /
6 3 0,000000:189 /
6 3 0,000000:190 /
6 3 0,000000:191 /
6 3 0,000000:192 /
6 3 0,000000:193 /
6 3 0,000000:194 /
6 3 0,000000:195 /
6 3 0,000000:196 /
6 3 0,000000:197 /
6 3 0,000000:198 /
6 3 0,000000:199 /
6 3 0,000000:200 /
6 3 0,000000:201 /
6 3 0,000000:202 /
6 3 0,000000:203 /
6 3 0,000000:204 /
6 3 0,000000:205 /
6 3 0,000000:206 /
6 3 0,000000:207 /
6 3 0,000000:208 /
6 3 0,000000:209 /
6 3 0,000000:210 /
6 3 0,000000:211 /
6 3 0,000000:212 /
6 3 0,000000:213 /
6 3 0,000000:214 /
6 3 0,000000:215 /
6 3 0,000000:216 /
6 3 0,000000:217 /
6 3 0,000000:218 /
6 3 0,000000:219 /
6 3 0,000000:220 /
6 3 0,000000:221 /
6 3 0,000000:222 /
6 3 0,000000:223 /
6 3 0,000000:224 /
6 3 0,000000:225 /
6 3 0,000000:226 /
6 3 0,000000:227 /
6 3 0,000000:228 /
6 3 0,000000:229 /
6 3 0,000000:230 /
6 3 0,000000:231 /
6 3 0,000000:232 /
6 3 0,000000:233 /
6 3 0,000000:234 /
6 3 0,000000:235 /
6 3 0,000000:236 /
6 3 0,000000:237 /
6 3 0,000000:238 /
6 3 0,000000:239 /
6 3 0,000000:240 /
6 3 0,000000:241 /
6 3 0,000000:242 /
6 3 0,000000:243 /
6 3 0,000000:244 /
6 3 0,000000:245 /
6 3 0,000000:246 /
6 3 0,000000:247 /
6 3 0,000000:248 /
6 3 0,000000:249 /
6 3 0,000000:250 /
6 3 0,000000:251 /
6 3 0,000000:252 /
6 3 0,000000:253 /
6 3 0,000000:254 /
6 3 0,000000:255 /
6 3 0,000000:256 /
6 3 0,000000:257 /
6 3 0,000000:258 /
6 3 0,000000:259 /
6 3 0,000000:260 /
6 3 0,000000:261 /
6 3 0,000000:262 /
6 3 0,000000:263 /
6 3 0,000000:264 /
6 3 0,000000:265 /
6 3 0,000000:266 /
6 3 0,000000:267 /
6 3 0,000000:268 /
6 3 0,000000:269 /
6 3 0,000000:270 /
6 3 0,000000:271 /
6 3 0,000000:272 /
6 3 0,000000:273 /
6 3 0,000000:274 /
6 3 0,000000:275 /
6 3 0,000000:276 /
6 3 0,000000:277 /
6 3 0,000000:278 /
6 3 0,000000:279 /
6 3 0,000000:280 /
6 3 0,000000:281 /
6 3 0,000000:282 /
6 3 0,000000:283 /
6 3 0,000000:284 /
6 3 0,000000:285 /
6 3 0,000000:286 /
6 3 0,000000:287 /
6 3 0,000000:288 /
6 3 0,000000:289 /
6 3 0,000000:290 /
6 3 0,000000:291 /
6 3 0,000000:292 /
6 3 0,000000:293 /
6 3 0,000000:294 /
6 3 0,000000:295 /
6 3 0,000000:296 /
6 3 0,000000:297 /
6 3 0,000000:298 /
6 3 0,000000:299 /
6 3 0,000000:300 /
6 3 0,000000:301 /
6 3 0,000000:302 /
6 3 0,000000:303 /
6 3 0,000000:304 /
6 3 0,000000:305 /
6 3 0,000000:306 /
6 3 0,000000:307 /
6 3 0,000000:308 /
6 3 0,000000:309 /
6 3 0,000000:310 /
6 3 0,000000:311 /
6 3 0,000000:312 /
6 3 0,000000:313 /
6 3 0,000000:314 /
6 3 0,000000:315 /
6 3 0,000000:316 /
6 3 0,000000:317 /
6 3 0,000000:318 /
6 3 0,000000:319 /
6 3 0,000000:320 /
6 3 0,000000:321 /
6 3 0,000000:322 /
6 3 0,000000:323 /
6 3 0,000000:324 /
6 3 0,000000:325 /
6 3 0,000000:326 /
6 3 0,000000:327 /
6 3 0,000000:328 /
6 3 0,000000:329 /
6 3 0,000000:330 /
6 3 0,000000:331 /
6 3 0,000000:332 /
6 3 0,000000:333 /
6 3 0,000000:334 /
6 3 0,000000:335 /
6 3 0,000000:336 /
6 3 0,000000:337 /
6 3 0,000000:338 /
6 3 0,000000:339 /
6 3 0,000000:340 /
6 3 0,000000:341 /
6 3 0,000000:342 /
6 3 0,000000:343 /
6 3 0,000000:344 /
6 3 0,000000:345 /
6 3 0,000000:346 /
6 3 0,000000:347 /
6 3 0,000000:348 /
6 3 0,000000:349 /
6 3 0,000000:350 /
6 3 0,000000:351 /
6 3 0,000000:352 /
6 3 0,000000:353 /
6 3 0,000000:354 /
6 3 0,000000:355 /
6 3 0,000000:356 /
6 3 0,000000:357 /
6 3 0,000000:358 /
6 3 0,000000:359 /
6 3 0,000000:360 /
6 3 0,000000:361 /
6 3 0,000000:362 /
6 3 0,000000:363 /
6 3 0,000000:364 /
6 3 0,000000:365 /
6 3 0,000000:366 /
6 3 0,000000:367 /
6 3 0,000000:368 /
6 3 0,000000:369 /
6 3 0,000000:370 /
6 3 0,000000:371 /
6 3 0,000000:372 /
6 3 0,000000:373 /
6 3 0,000000:374 /
6 3 0,000000:375 /
6 3 0,000000:376 /
6 3 0,000000:377 /
6 3 0,000000:378 /
6 3 0,000000:379 /
6 3 0,000000:380 /
6 3 0,000000:381 /
6 3 0,000000:382 /
6 3 0,000000:383 /
6 3 0,000000:384 /
6 3 0,000000:385 /
6 3 0,000000:386 /
6 3 0,000000:387 /
6 3 0,000000:388 /
6 3 0,000000:389 /
6 3 0,000000:390 /
6 3 0,000000:391 /
6 3 0,000000:392 /
6 3 0,000000:393 /
6 3 0,000000:394 /
6 3 0,000000:395 /
6 3 0,000000:396 /
6 3 0,000000:397 /
6 3 0,000000:398 /
6 3 0,000000:399 /
6 3 0,000000:400 /
6 3 0,000000:401 /
6 3 0,000000:402 /
6 3 0,000000:403 /
6 3 0,000000:404 /
6 3 0,000000:405 /
6 3 0,000000:406 /
6 3 0,000000:407 /
6 3 0,000000:408 /
6 3 0,000000:409 /
6 3 0,000000:410 /
6 3 0,000000:411 /
6 3 0,000000:412 /
6 3 0,000000:413 /
6 3 0,000000:414 /
6 3 0,000000:415 /
6 3 0,000000:416 /
6 3 0,000000:417 /
6 3 0,000000:418 /
6 3 0,000000:419 /
6 3 0,000000:420 /
6 3 0,000000:421 /
6 3 0,000000:422 /
6 3 0,000000:423 /
6 3 0,000000:424 /
6 3 0,000000:425 /
6 3 0,000000:426 /
6 3 0,000000:427 /
6 3 0,000000:428 /
6 3 0,000000:429 /
6 3 0,000000:430 /
6 3 0,000000:431 /
6 3 0,000000:432 /
6 3 0,000000:433 /
6 3 0,000000:434 /
6 3 0,000000:435 /
6 3 0,000000:436 /
6 3 0,000000:437 /
6 3 0,000000:438 /
6 3 0,000000:439 /
6 3 0,000000:440 /
6 3 0,000000:441 /
6 3 0,000000:442 /
6 3 0,000000:443 /
6 3 0,000000:444 /
6 3 0,000000:445 /
6 3 0,000000:446 /
6 3 0,000000:447 /
6 3 0,000000:448 /
6 3 0,000000:449 /
6 3 0,000000:450 /
6 3 0,000000:451 /
6 3 0,000000:452 /
6 3 0,000000:453 /
6 3 0,000000:454 /
6 3 0,000000:455 /
6 3 0,000000:456 /
6 3 0,000000:457 /
6 3 0,000000:458 /
6 3 0,000000:459 /
6 3 0,000000:460 /
6 3 0,000000:461 /
6 3 0,000000:462 /
6 3 0,000000:463 /
6 3 0,000000:464 /
6 3 0,000000:465 /
6 3 0,000000:466 /
6 3 0,000000:467 /
6 3 0,000000:468 /
6 3 0,000000:469 /
6 3 0,000000:470 /
6 3 0,000000:471 /
6 3 0,000000:472 /
6 3 0,000000:473 /
6 3 0,000000:474 /
6 3 0,000000:475 /
6 3 0,000000:476 /
6 3 0,000000:477 /
6 3 0,000000:478 /
6 3 0,000000:479 /
6 3 0,000000:480 /
6 3 0,000000:481 /
6 3 0,000000:482 /
6 3 0,000000:483 /
6 3 0,000000:484 /
6 3 0,000000:485 /
6 3 0,000000:486 /
6 3 0,000000:487 /
6 3 0,000000:488 /
6 3 0,000000:489 /
6 3 0,000000:490 /
6 3 0,000000:491 /
6 3 0,000000:492 /
6 3 0,000000:493 /
6 3 0,000000:494 /
6 3 0,000000:495 /
6 3 0,000000:496 /
6 3 0,000000:497 /
6 3 0,000000:498 /
6 3 0,000000:499 /
6 3 0,000000:500 /
6 3 0,000000:501 /
6 3 0,000000:502 /
6 3 0,000000:503 /
6 3 0,000000:504 /
6 3 0,000000:505 /
6 3 0,000000:506 /
6 3 0,000000:507 /
6 3 0,000000:508 /
6 3 0,000000:509 /
6 3 0,000000:510 /
6 3 0,000000:511 /
6 3 0,000000:512 /
6 3 0,000000:513 /
6 3 0,000000:514 /
6 3 0,000000:515 /
6 3 0,000000:516 /
6 3 0,000000:517 /
6 3 0,000000:518 /
6 3 0,000000:519 /
6 3 0,000000:520 /
6 3 0,000000:521 /
6 3 0,000000:522 /
6 3 0,000000:523 /
6 3 0,000000:524 /
6 3 0,000000:525 /
6 3 0,000000:526 /
6 3 0,000000:527 /
6 3 0,000000:528 /
6 3 0,000000:529 /
6 3 0,000000:530 /
6 3 0,000000:531 /
6 3 0,000000:532 /
6 3 0,000000:533 /
6 3 0,000000:534 /
6 3 0,000000:535 /
6 3 0,000000:536 /
6 3 0,000000:537 /
6 3 0,000000:538 /
6 3 0,000000:539 /
6 3 0,000000:540 /
6 3 0,000000:541 /
6 3 0,000000:542 /
6 3 0,000000:543 /
6 3 0,000000:544 /
6 3 0,000000:545 /
6 3 0,000000:546 /
6 3 0,000000:547 /
6 3 0,000000:548 /
6 3 0,000000:549 /
6 3 0,000000:550 /
6 3 0,000000:551 /
6 3 0,000000:552 /
6 3 0,000000:553 /
6 3 0,000000:554 /
6 3 0,000000:555 /
6 3 0,000000:556 /
6 3 0,000000:557 /
6 3 0,000000:558 /
6 3 0,000000:559 /
6 3 0,000000:560 /
6 3 0,000000:561 /
6 3 0,000000:562 /
6 3 0,000000:563 /
6 3 0,000000:564 /
6 3 0,000000:565 /
6 3 0,000000:566 /
6 3 0,000000:567 /
6 3 0,000000:568 /
6 3 0,000000:569 /
6 3 0,000000:570 /
6 3 0,000000:571 /
6 3 0,
```



- **Расчет на прочность (главные и эквивалентные напряжения)**

Согласно п. 8.1 [3] расчет на прочность листовых конструкций (оболочек вращения), находящихся в безмоментном напряженном состоянии, следует выполнять по формуле:

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq R_y \gamma_c$$

где σ_x, σ_y – нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям;
 γ_c – коэффициент условий работы конструкций, назначаемый в соответствии с требованиями СНиП по проектированию сооружений промышленных предприятий.

При этом абсолютные значения главных напряжений должны быть не более значений расчетных сопротивлений, умноженных на γ_c .

В программе **SCAD** реализовано четыре теории прочности, сведения о которых приведены в таблице. Все они относятся к изотропным материалам и условиям статического нагружения, когда история поведения конструкции не сказывается на формулировке условий разрушения.

При определении вида выводимой информации в программе **SCAD** приняты следующие условные обозначения:

S1, S2, S3 – главные напряжения;

NE1 – эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному растяжению) по первой теории прочности;

NS1 – эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному сжатию) по первой теории прочности;

NE2, NE3, NE4 – эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному растяжению) по 2 – 4 теориям прочности;

NS2, NS3, NS4 – эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному сжатию) по 2 – 4 теориям прочности.



• Расчет на прочность (главные и эквивалентные напряжения)

№ п/п	Теории прочности	Выражение для вычисления эквивалентного напряжения растяжения σ_e и сжатия σ_s	Сфера применения
1	Теория максимальных нормальных напряжений	$\sigma_e = \sigma_1$ $\sigma_s = \sigma_3 $	Для хрупких однородных материалов (керамика, стекло)
2	Теория наибольших линейных деформаций	$\sigma_e = \sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3)$ $\sigma_s = \sigma_3 - \mu (\sigma_1 + \sigma_2) $	
3	Теория наибольших касательных напряжений	$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3$ $\sigma_s = \sigma_e$	Для пластических материалов с малым упрочнением, для которых характерно появление локальных пластических деформаций в виде линий скольжения (отпущенная сталь)
4	Теория октаэдрических касательных напряжений или удельной энергии формоизменения (энергетическая теория Губера-Хенки-Мизеса)	$\sigma_e = \sigma_i = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2}$ $\sigma_s = \sigma_e$	Для большинства пластических материалов (сталь, медь, никель)

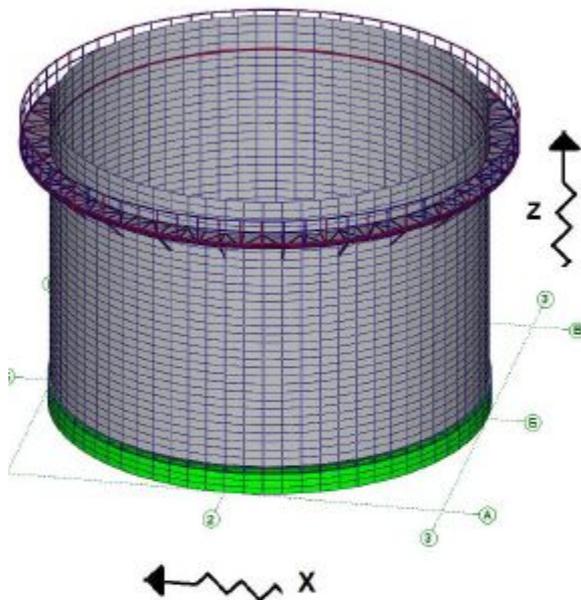
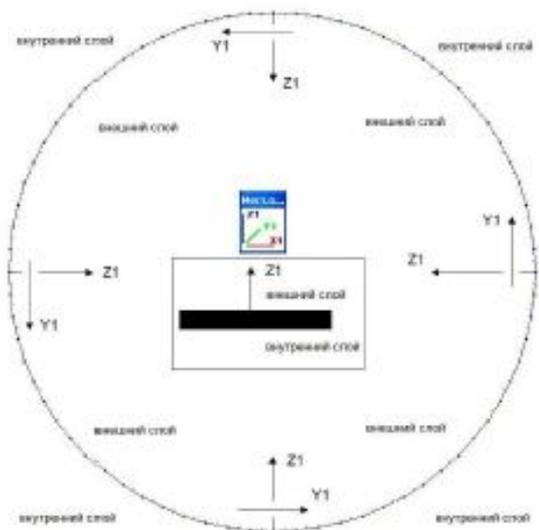
При простых видах деформации, в частности, при одноосном напряженном состоянии об опасности действующих напряжений судят, сопоставляя их с экспериментально устанавливаемой величиной (с пределом текучести для пластических материалов или с временным сопротивлением для хрупких тел).

Для сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями σ_1 , σ_2 и σ_3 , обычно используется некоторая гипотеза (теория прочности) о преимущественном влиянии на прочность материала того или иного фактора. При этом предусматривается возможность сопоставления некоторого эквивалентного напряжения с пределом, который соответствует простому одноосному растяжению.

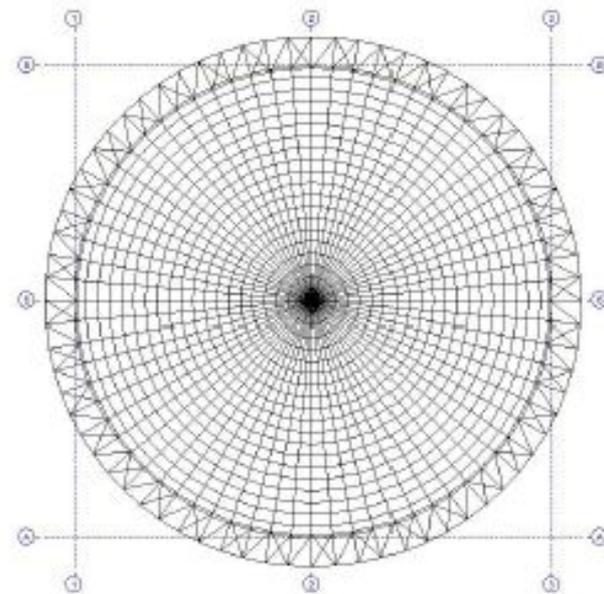
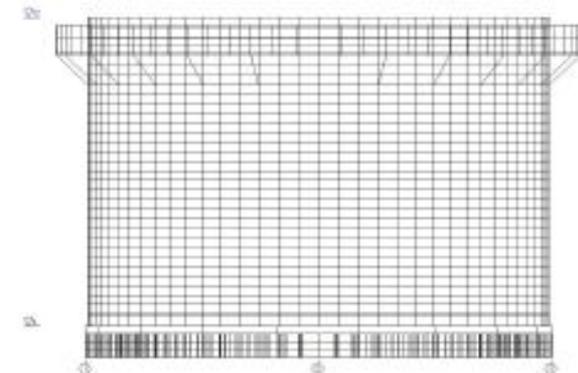
В нашем случае нас интересуют главные напряжения согласно 4-ой теории прочности во внутреннем и внешнем слое стенки резервуара.



Расчетная схема резервуара



Общий вид расчетной схемы



Общий вид расчетной схемы

внутренний
слой

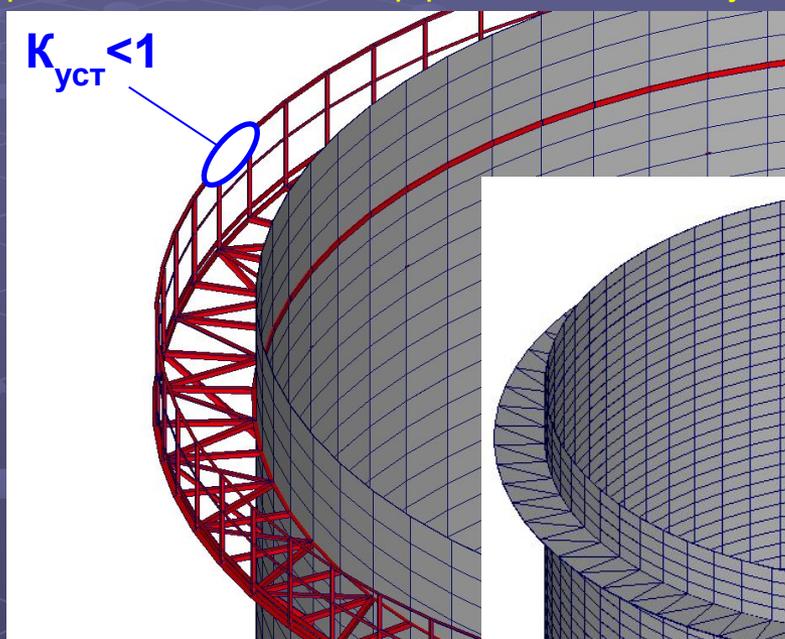
внешний слой

внутренний
слой

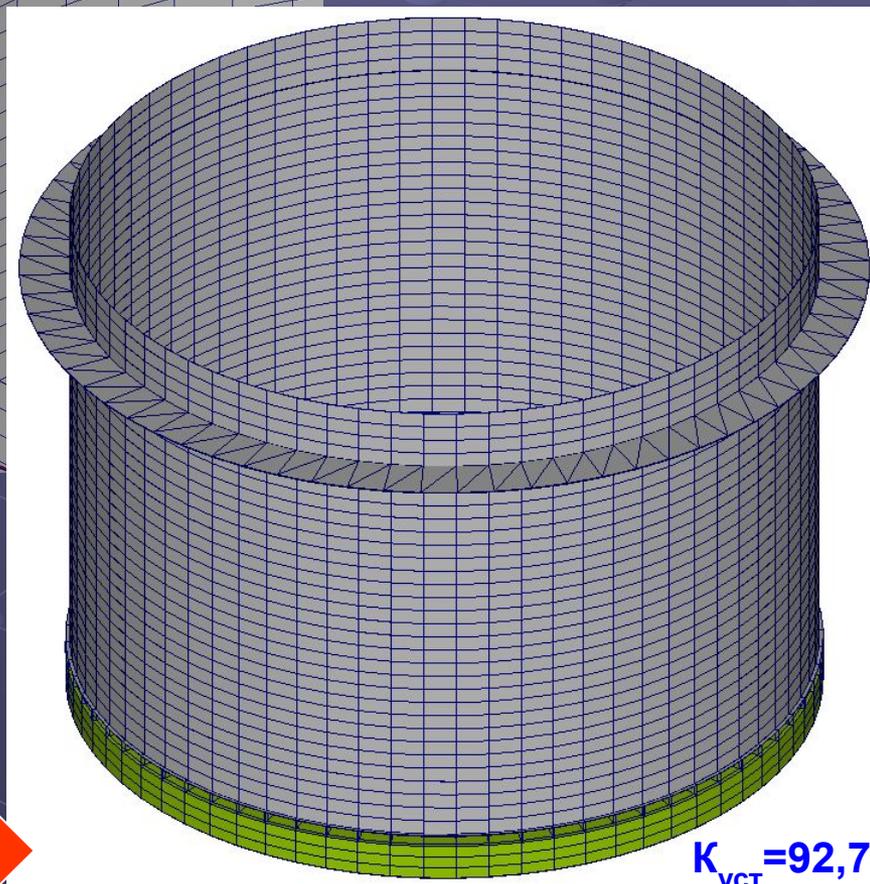


• Проверка устойчивости

Проверка устойчивости показала, что элементы обслуживающей площадки теряют устойчивость при нагрузках меньших, чем расчетные и, тем самым выключаются из работы. Поэтому был выполнен второй расчет, где участие обслуживающей площадки в общей работе резервуара исключалось. Проверка устойчивости только резервуара дала значение коэффициента запаса устойчивости 92,7.

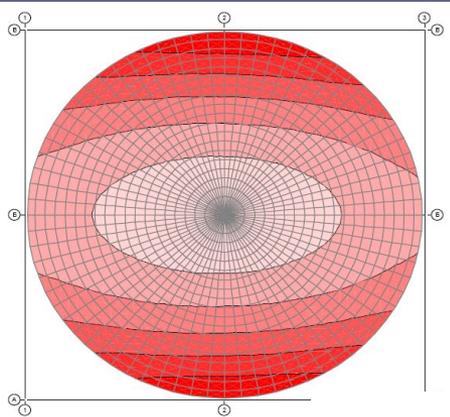


Расчетная схема
для проверки
устойчивости
резервуара





• Перемещения днища (при горизонтальном сейсме)

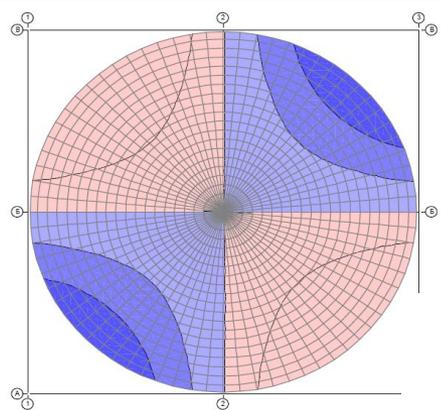


16.83	17.85	21.29	23.11
17.85	19.47	23.11	24.93
19.47	21.29	24.93	26.76

X = +15,83...+26,76 мм

Перемещения X (мм), Загружение 1

Перемещения днища вдоль оси X, мм

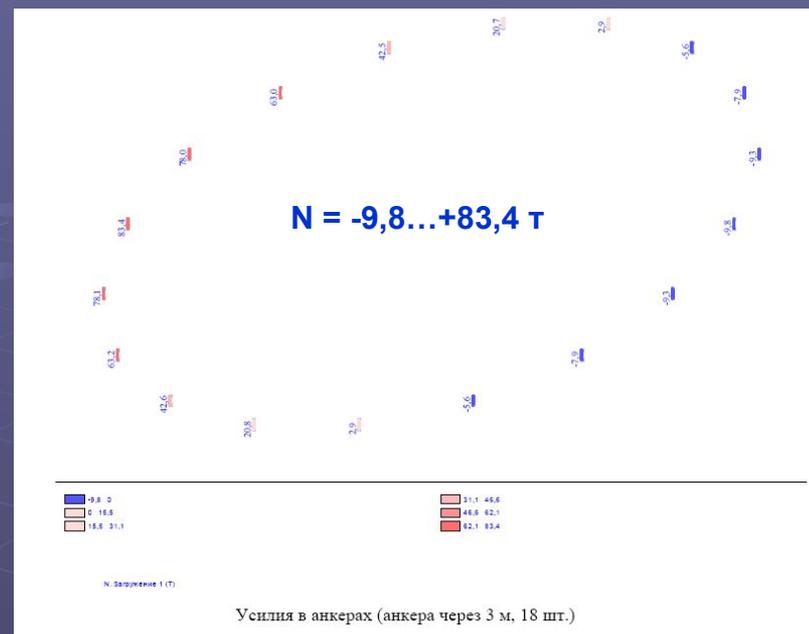


-3.97	-3.96	-1.32	0
-3.96	-2.84	0	1.32
-2.84	-1.32	1.32	3.96

Y = -3,97...+3,96 мм

Перемещения Y (мм), Загружение 1

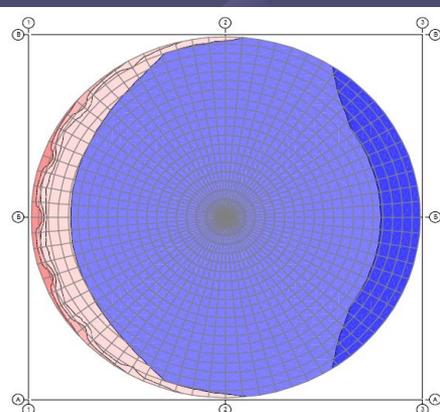
Перемещения днища вдоль оси Y, мм



-9,8	0	31,1	46,6
0	16,8	46,6	82,1
16,8	31,1	82,1	83,4

N, Загружение 1 (T)

Усилия в анкерах (анкера через 3 м, 18 шт.)



-14,72	-8,79	8,79	17,59
-8,79	0	17,59	26,38
0	8,79	26,38	38,05

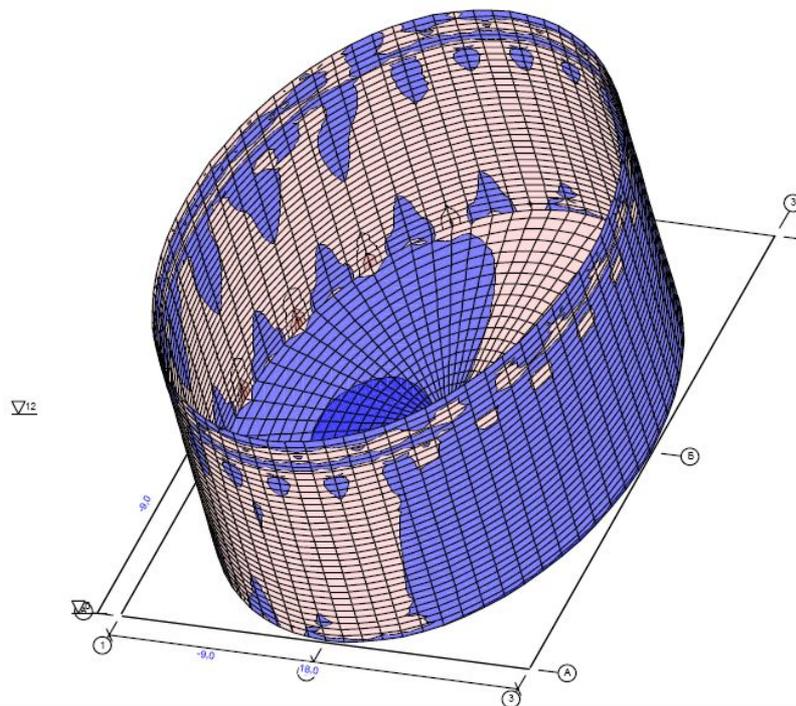
Z = -14,72...+38,05 мм

Перемещения Z (мм), Загружение 1

Перемещения днища вдоль оси Z, мм

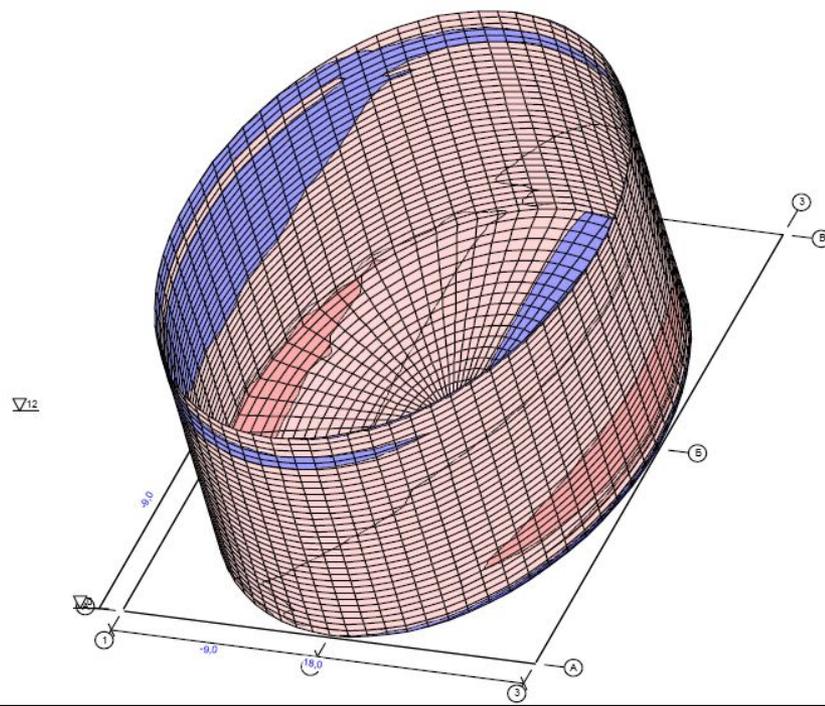


• Напряжения в днище и стенке (при горизонтальном сейсме)



NX. Загружение 1 (Т/м²)

Напряжения NX, т/м²



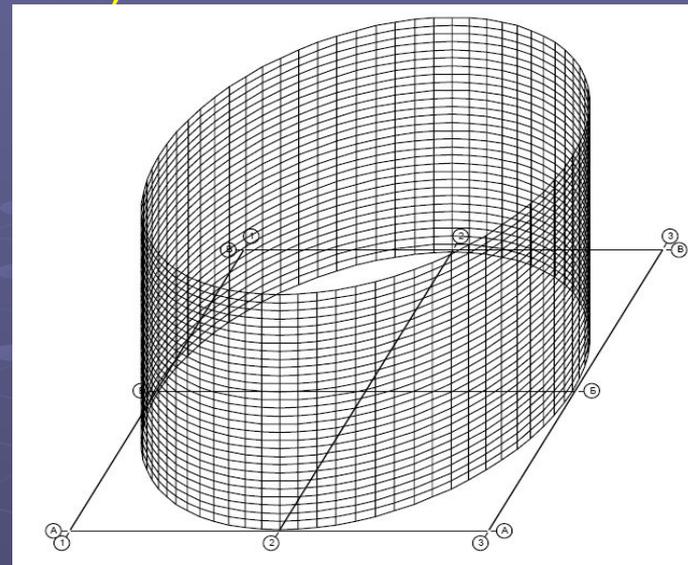
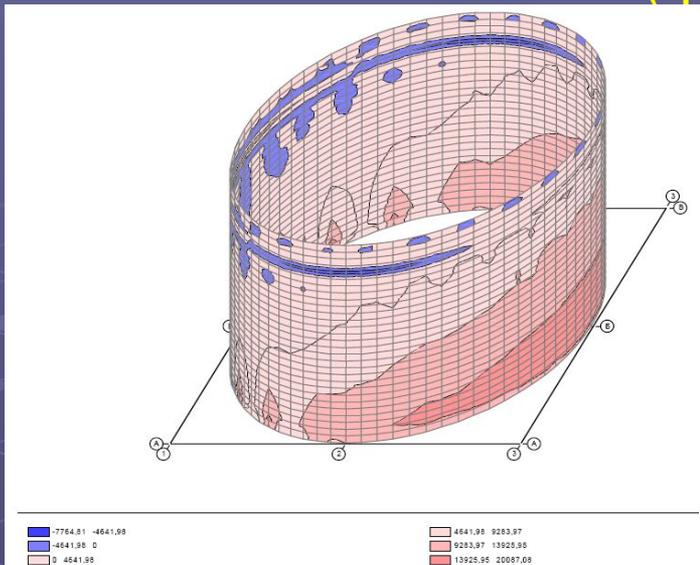
NY. Загружение 1 (Т/м²)

Напряжения NY, т/м²



• Главные напряжения в стенке резервуара
(при горизонтальном сейсме)

Внутренний
слой

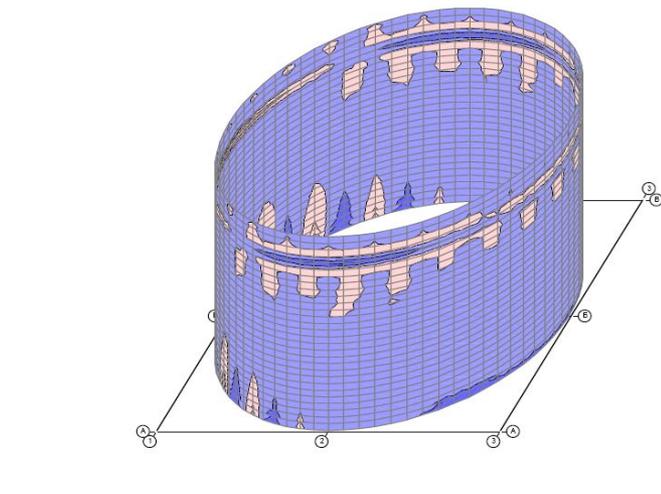


Внутренний слой S1 ТМ2 Загружение 1
Напряжения S1, т/м²

Напряжения S2, т/м²

S1 = -7 765...+20 087 т/м²

S2 = 0 т/м²

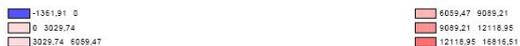
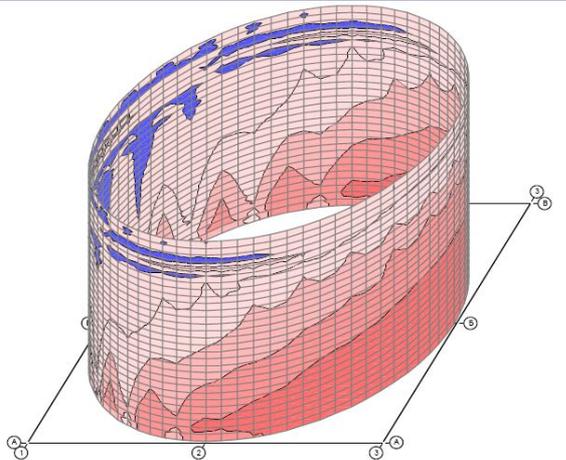


Внутренний слой S3 ТМ2 Загружение 1
Напряжения S3, т/м²

S3 = -8 225...+14 488 т/м²



• Главные напряжения в стенке резервуара (при горизонтальном сейсме)



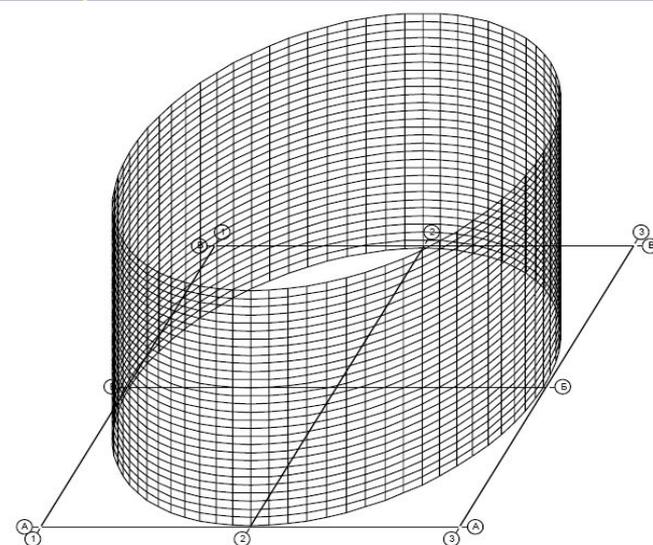
Внешний слой S1 ТИ2 Загружене 1

Напряжения S1, т/м²



S1 = -1 362...+16 817 т/м²

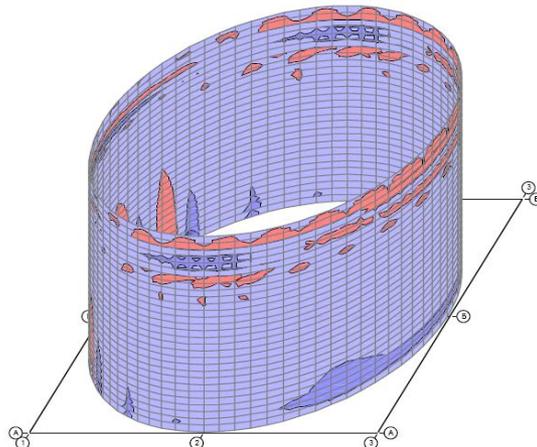
**Внешний
слой**



Напряжения S2, т/м²



S2 = 0 т/м²



Внешний слой S3 ТИ2 Загружене 1

Напряжения S3, т/м²



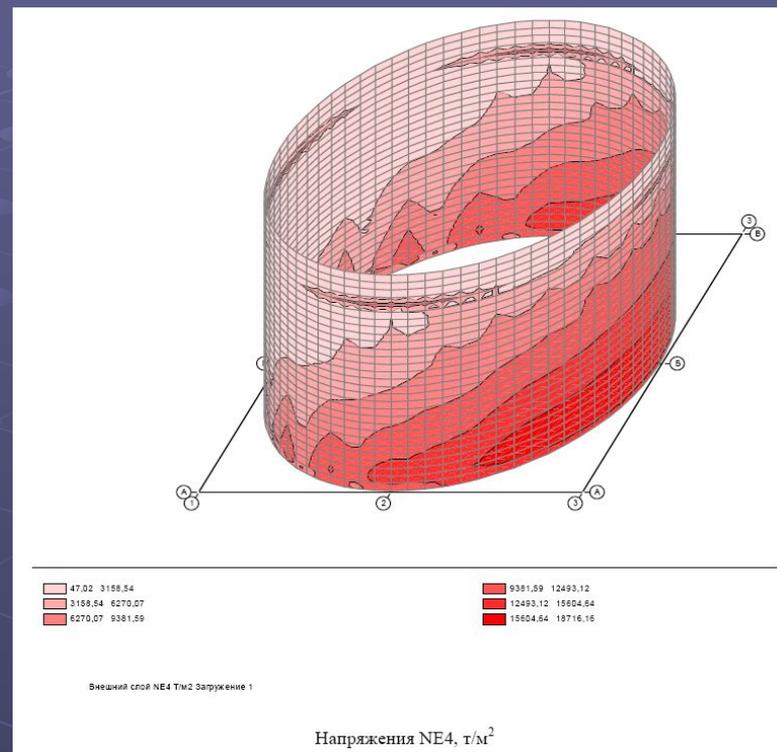
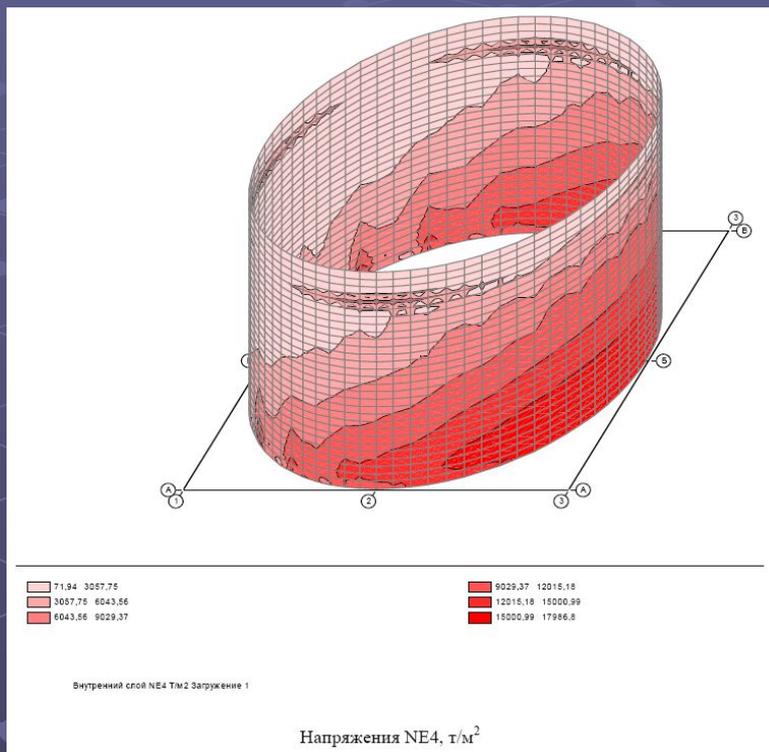
S3 = -14 703...+2 535 т/м²



Эквивалентные напряжения в стенке резервуара (при горизонтальном сейсме)

Внутренний слой

Внешний слой



NE4 = +71...+17 987 т/м²

NE4 = +47...+18 716 т/м²

для стали 09Г2С

Ry = 32 000x0,7 = 22 400 т/м²

запас прочности ≈ 16%

• Общие выводы и рекомендации

1. Принятые при расчете толщины поясов (I–IV пояс сталь 09Г2С, V–VII пояс сталь СтЗсп5) стенки резервуара 8-12 мм (рис. 1) обеспечивают ее прочность и устойчивость в условиях статических и сейсмических воздействий.
2. Коэффициент запаса устойчивости несущих конструкций резервуара составляет 92,7.
3. Корпус резервуара должен быть оборудован минимум 18 анкерами (с шагом 3,0 м) диаметром не менее 36 мм из стали марки 09Г2С. Усилия в анкерах при горизонтальном сейсмическом воздействии составляют $-9,75...+83,44$ т.
4. Максимальная высота волны у стенок резервуара при сейсмике в 7 баллов составляет 1,36 м.
5. Перемещения днища резервуара при горизонтальной сейсмической нагрузке при наличии анкеров составляют:
 - вдоль оси X: $+15,83...+26,76$ мм;
 - вдоль оси Y: $-3,97...+3,96$ мм;
 - вдоль оси Z: $-14,72...+38,05$ мм.
6. Максимальные напряжения в резервуаре без учета коэффициента условий работы составляют
 - $N_X = -7\ 644...+17\ 765$ т/м² ($-764,4...+1776,5$ кг/см²) – вдоль стенки резервуара;
 - $N_Y = -20\ 955...+21\ 602$ т/м² ($-2095,5...+2160,2$ кг/см²) – по окружности.
7. Максимальные эквивалентные напряжения по 4-ой энергетической теории прочности в стенке резервуара (см. рис. 7) без учета коэффициента условий работы составляют:
 - во внешнем слое $NE_4 = 17\ 786$ т/м² ($1\ 778,6$ кг/см²);
 - во внутреннем слое $NE_4 = 18\ 716$ т/м² ($1\ 871,6$ кг/см²).



• Список использованной литературы

1. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой ССР. М.: ЦИТП Госстроя ССР, 1987.
2. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах / Минстрой России – М.: ГП ЦПП, 1996. – 52 с.
3. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. / Минстрой России.– М.: ГП ЦПП, 1996. – 96 с.
4. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 88с.
5. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
6. Справочник по динамике сооружений. – М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.
7. Динамические расчеты сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика / Под ред. Коренева Б.Г. и Рабиновича И.М.– М.: Стройиздат, 1981.
8. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
9. Стандарт API 650. Сварные стальные резервуары для хранения нефти.
10. Нехаев Г.А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. Изд-во: АСВ, 2005. – 216 с.
11. Инструкция по проектированию, изготовлению и монтажу вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Алматы, МИТ РК, 2005.
12. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. Книга 2. / Под ред. А.А Уманского. – М.: Стройиздат, 1973. – 416 с.
13. SCAD для пользователя / В.С.Карпиловский, Э.З.Криксунов, А.А. Маляренко, А.А. Перельмутер, М.А.Перельмутер. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2007. – 609 с.



- **Возможные аварии при эксплуатации резервуаров**

