



# Российские САЕ-системы на службе промышленности<sup>2020</sup>

## Усталостный расчёт: текущее состояние и дальнейшие перспективы

Михаил Ростовцев

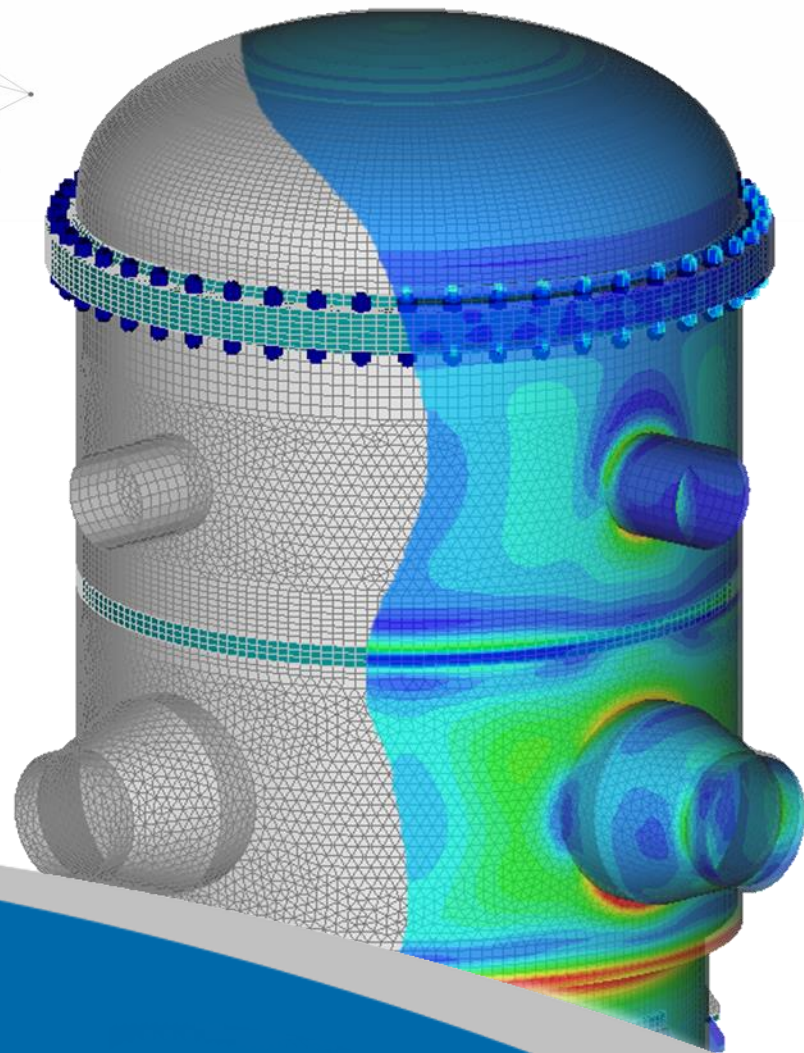


НТЦ «АПМ» - ведущий разработчик ПО для инженерных расчетов

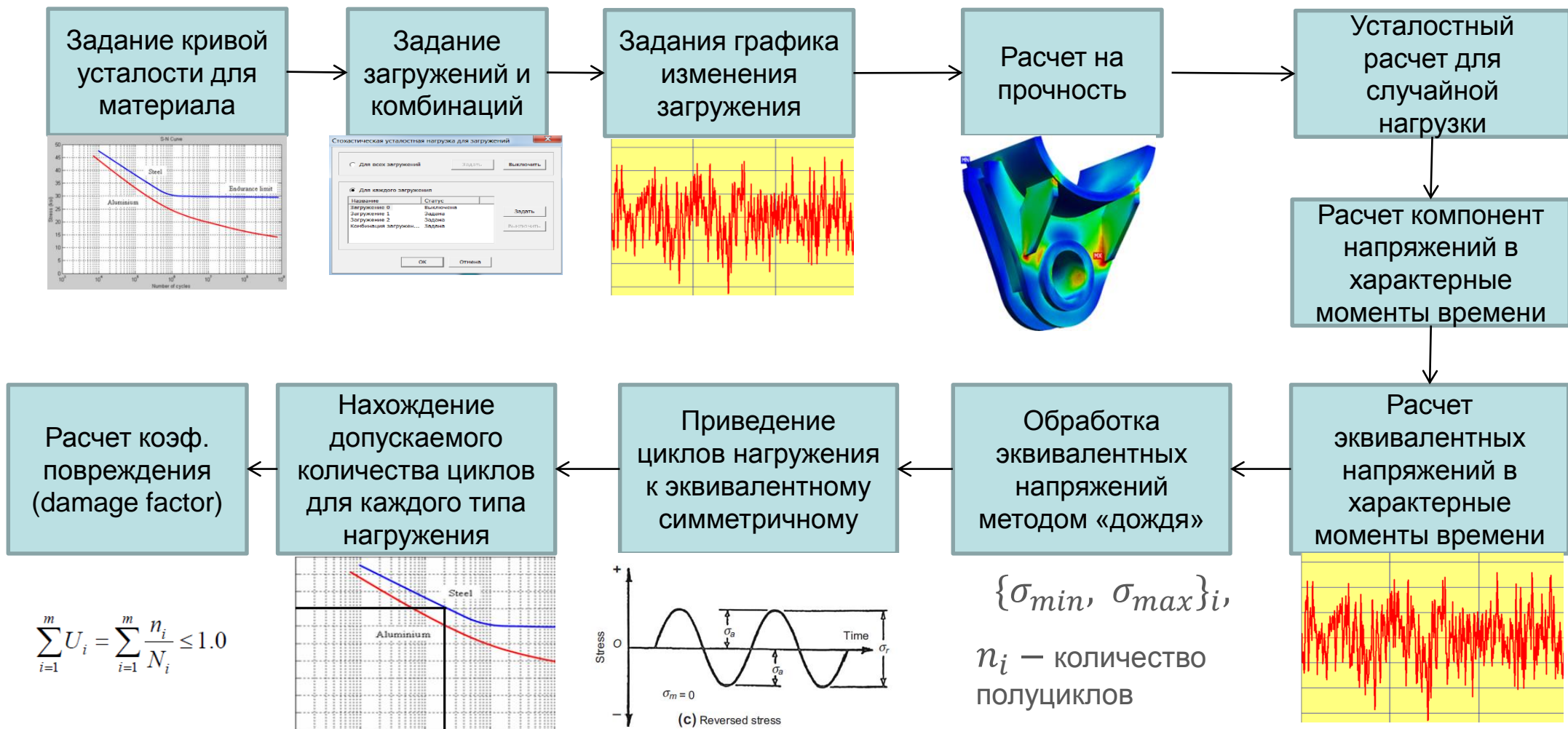


# Усталостный расчёт

Основные сведения

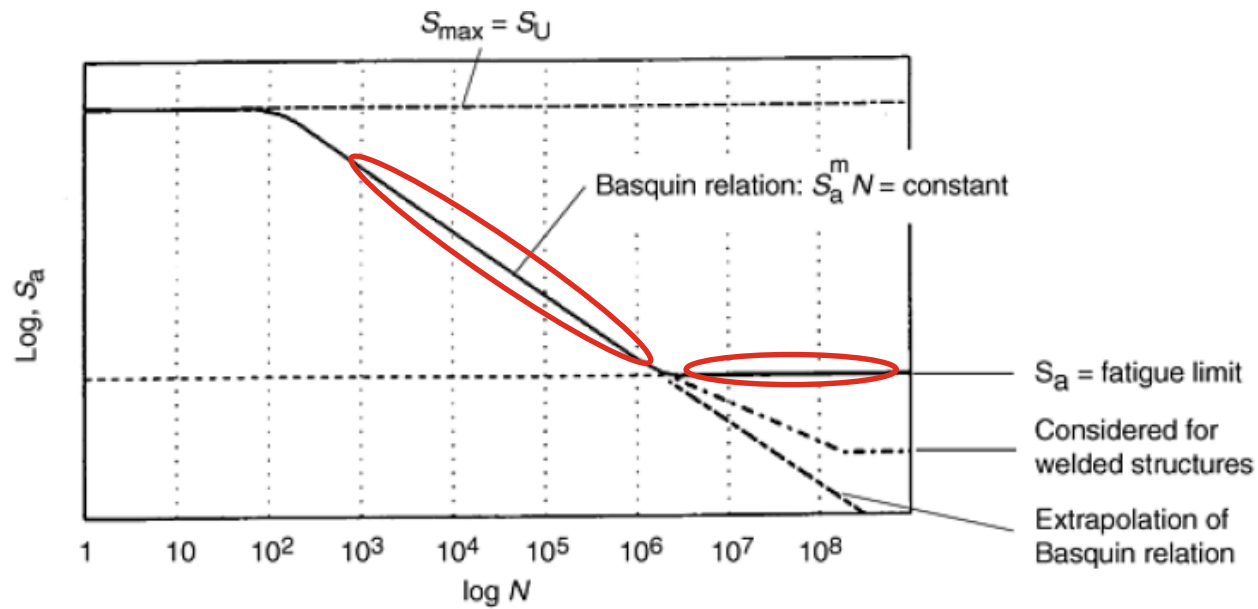
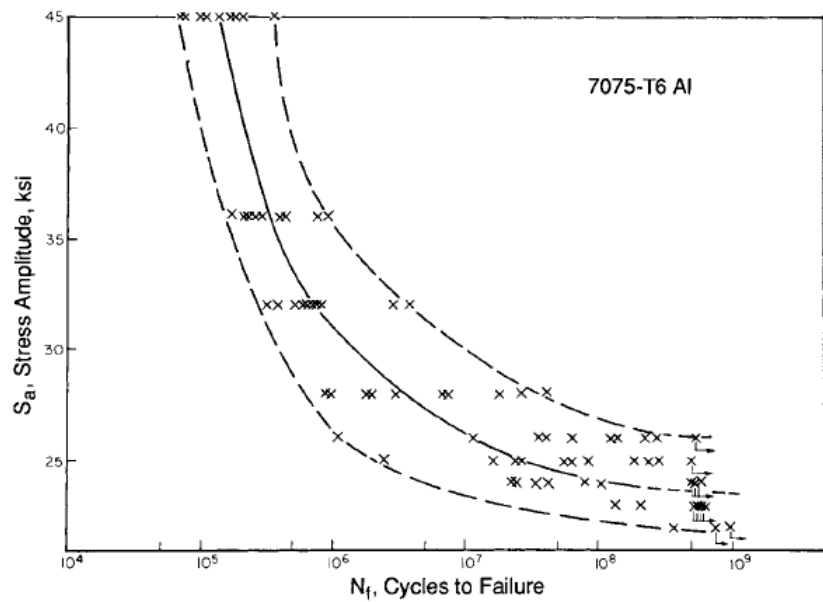


## Алгоритм усталостного расчёта

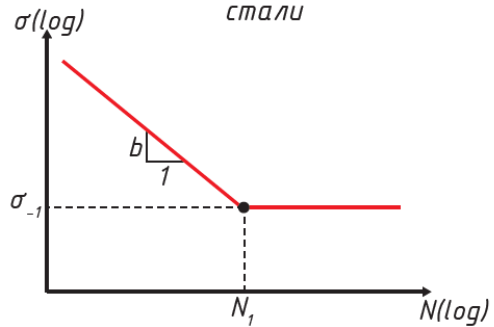




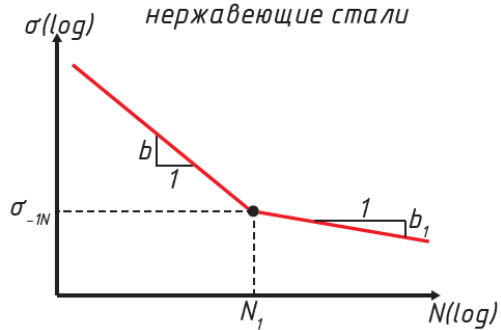
## Кривые выносливости



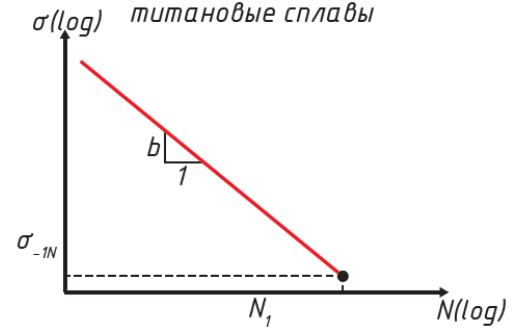
Углеродистые и среднелегированные стали



Алюминий, медь и их сплавы и нержавеющие стали



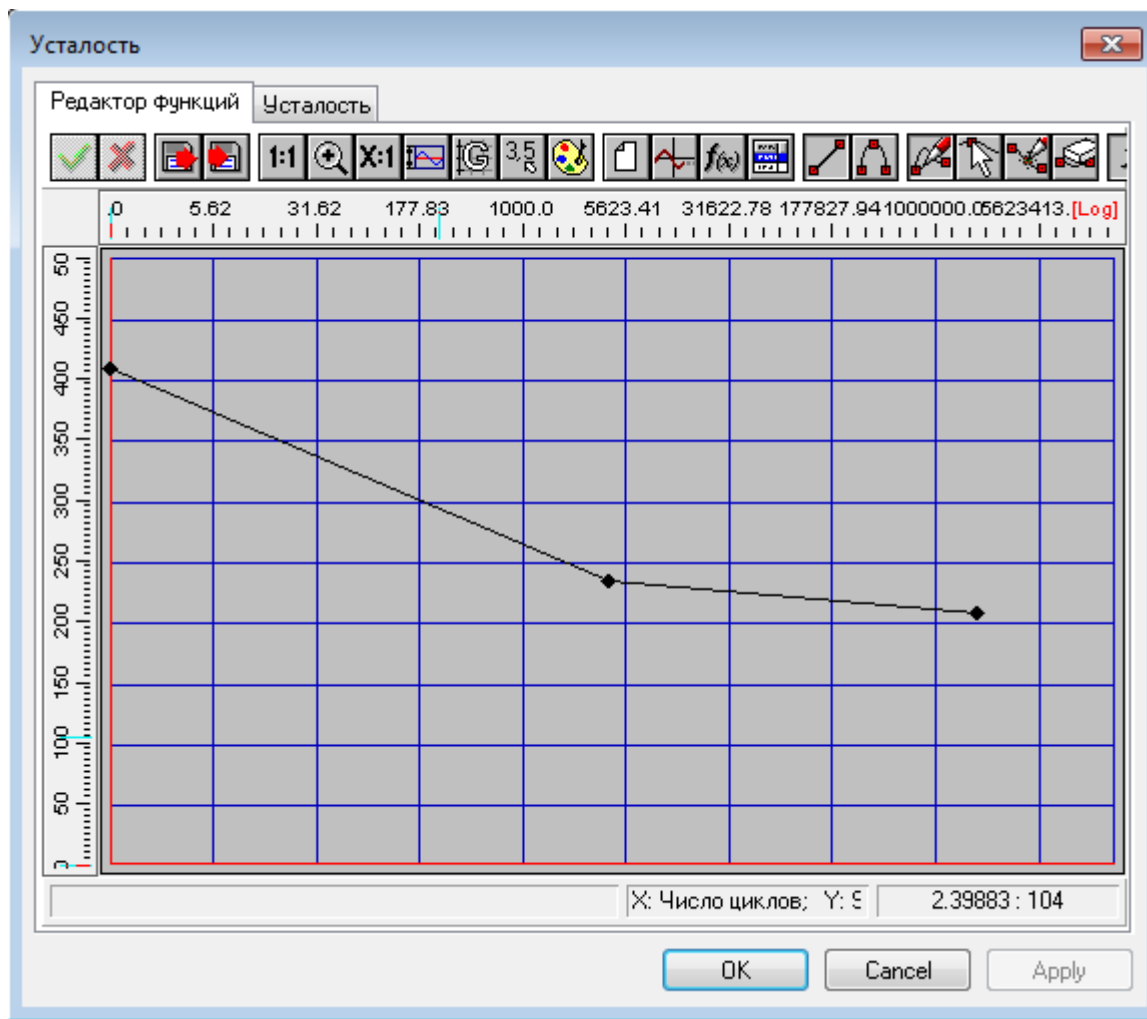
Высокопрочные стали и титановые сплавы







## Задание кривой выносливости



Аналитическое выражение кривой выносливости:

$$\begin{cases} \sigma^m \cdot N = \text{const}, & 10^3 < N \leq N_G, \\ \sigma = \sigma_{-1} = \text{const}, & N > N_G \end{cases},$$

где  $m$  – показатель степени, зависящий от материала и термообработки:

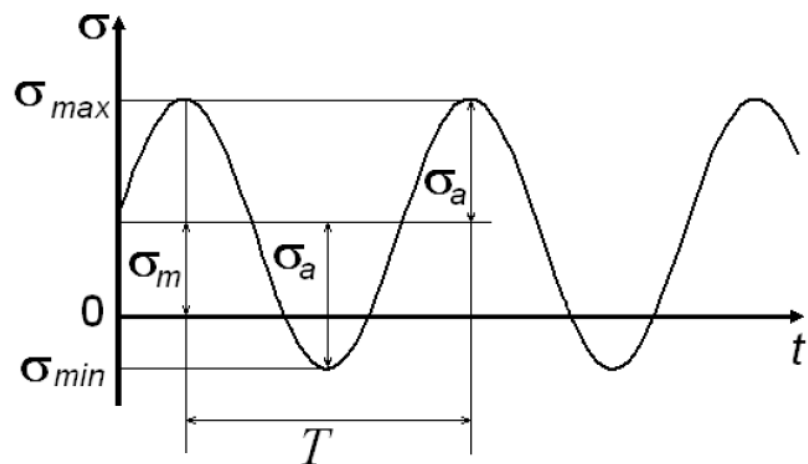
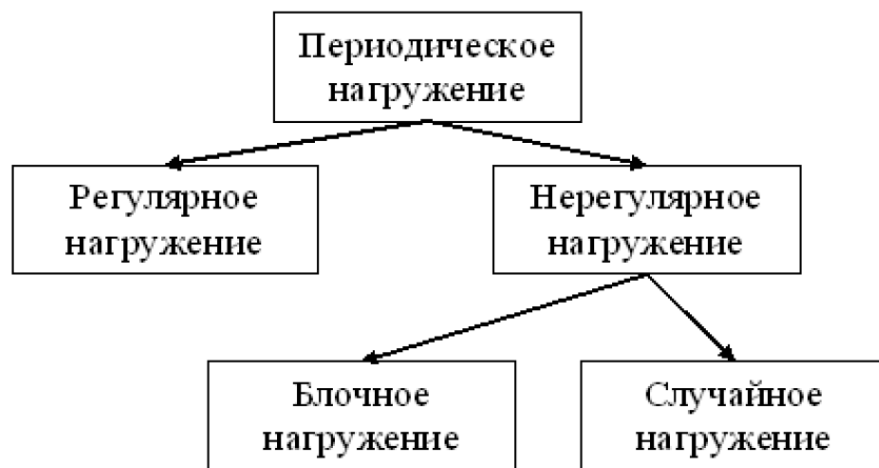
$$m = \frac{1}{K_d} \cdot \left( 5 + \frac{\sigma_B}{80} \right),$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности в МПа,

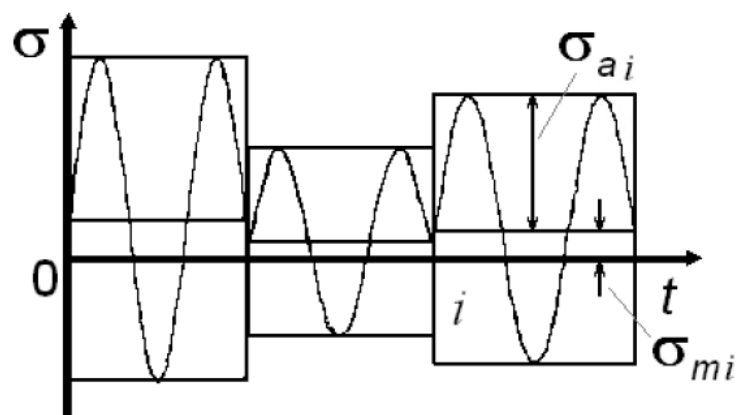
$K_d$  – масштабный коэффициент, зависящий от линейных размеров детали



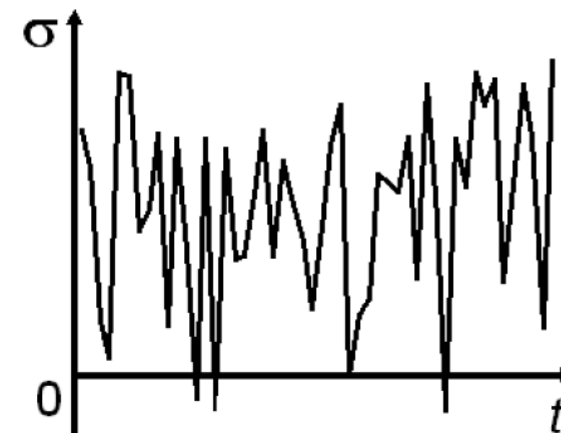
## Виды нагрузений



Регулярное нагружение



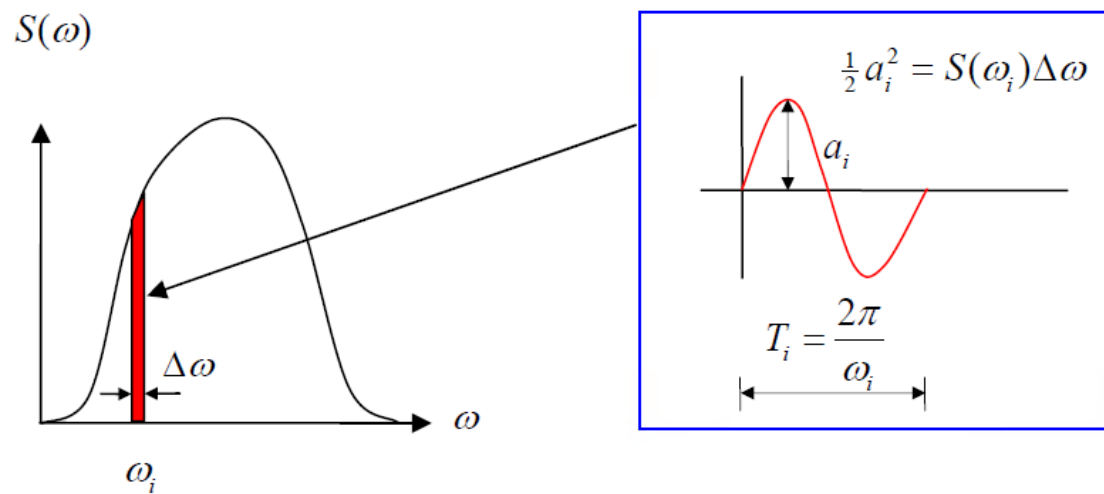
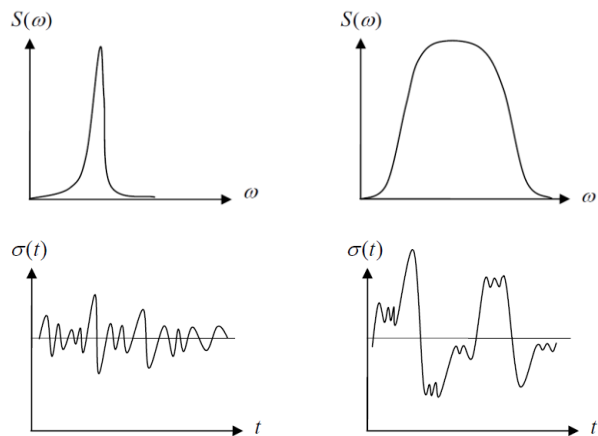
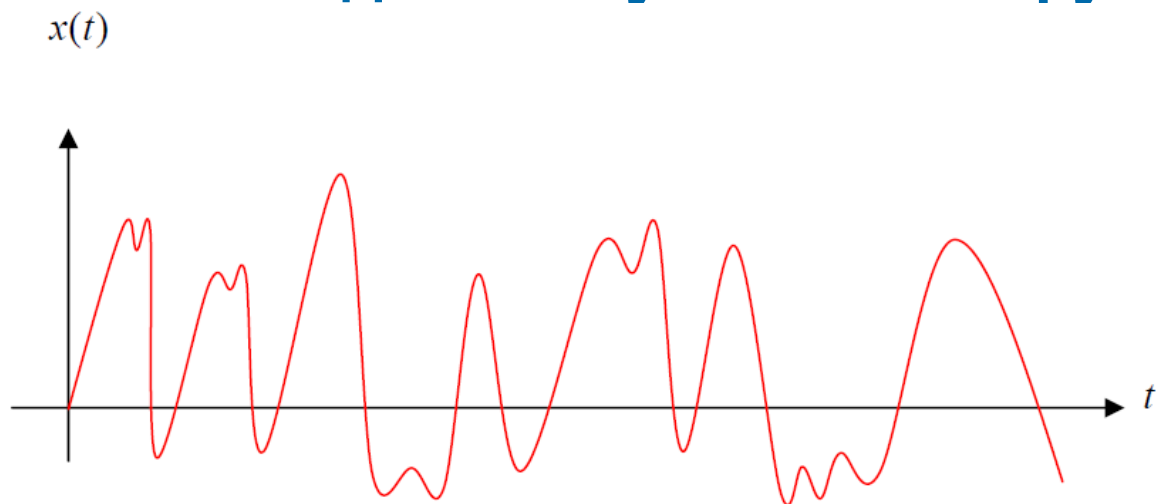
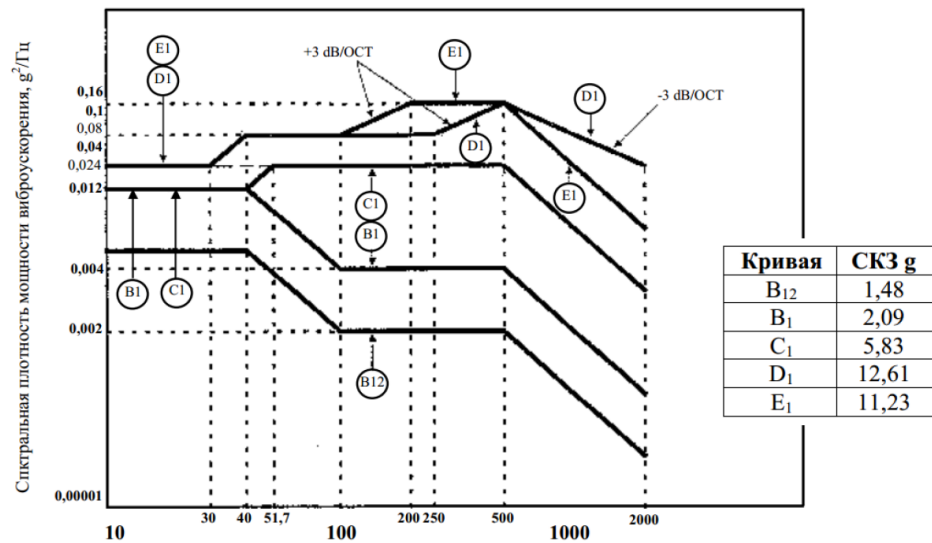
Блочное нагружение



Случайной нагружение



## Задание случайного нагружения





## Синтез случайного нагружения

Усталостная многостадийная случайная нагрузка - Все загрузки

Общие параметры нагрузки

☒ Включить для расчета ☐ Расчет через вын. колебания

Число повторений многостадийной нагрузки

Общая частота оцифровки для всех стадий, [Гц]

Число точек для межстадийного сглаживания  =

№.	Тип стадии	Имя стадии	Статус	Флаг	Число точек
1	Спектральная зависимость	Не задано	Включен	Вычислен	1000

Работа со стадиями усталостной нагрузки

Итоговые параметры многостадийной усталостной нагрузки

Суммарное число точек графика

Суммарное время графика, [с]

Суммарное время заданного нагружения, [с]

График усталостной нагрузки

Экспорт

Суммарная нагрузка

Интервалов гистограммы

Настройка стадии усталостной нагрузки - Все загрузки

☒ Включить для расчета

Название стадии нагрузки

Вычисленные параметры

dD  eD  Циклов

As/As0  Ex/Ex0  NCS

NR  STD  NTS

Графики стадии нагрузки

Формат сохранения

Интервалов гистограммы

Входные параметры нагрузки, заданной СПМ

Параметры спектральной плотности мощности

Название

Частотные параметры

Jk  KOm  ☐ Log10 по частоте

Линейное преобразование:  $F(x)=Ax+B$

Применить ☐ A  B

Общие параметры расчета

T, [с]  Точек  Пов-торов





## Синтез случайного нагружения

Спектральная плотность мощности - Все загрузки

Наименование: B2

Шаблон СПМ: B2, СКЗ=0.70

Выбрать

N	f, Гц	A, m/c^2	Угол наклона, дБ/окт.
1	10	0.003	0
2	40	0.003	-5.89
3	100	0.0005	0
4	500	0.0005	-6.11
5	2000	3e-05	

Точка

+ Перед

+ После

- Удалить

Текущие значения точки

f: 10 A: 0.003

Применить

Вычисленные параметры

f\_min: 10 f\_max: 2000

Точек: 5 СКЗ: 0.740155

Таблица СПМ

Загрузить...

Сохранить...

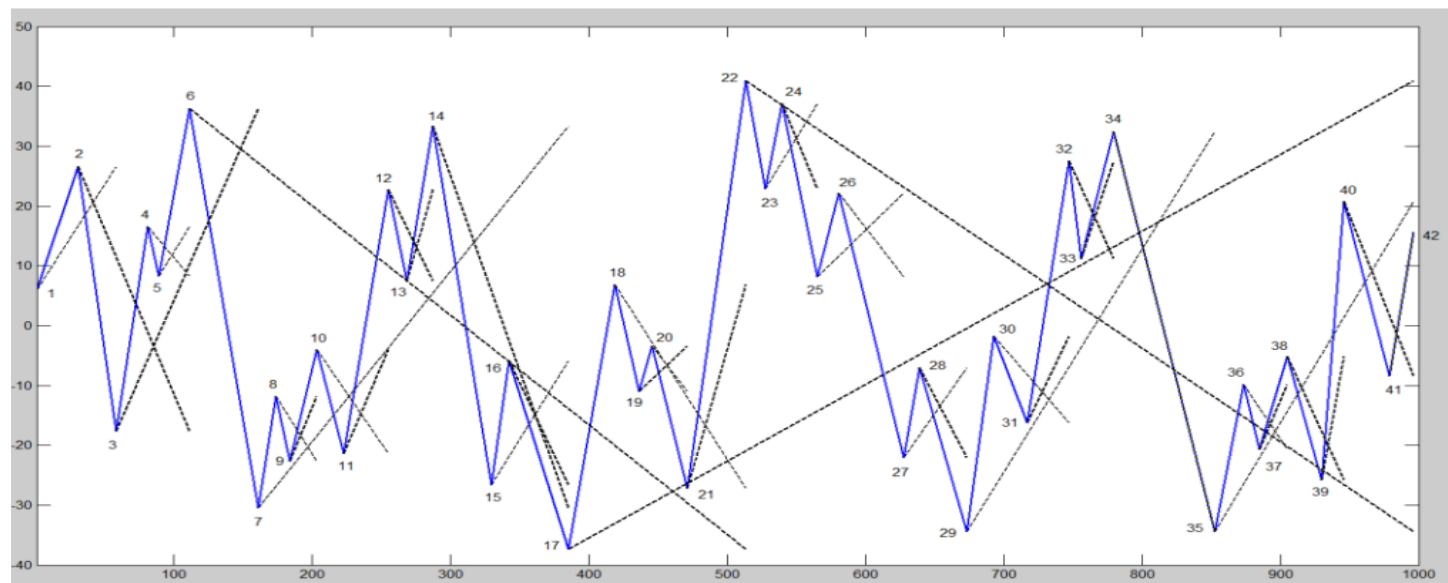
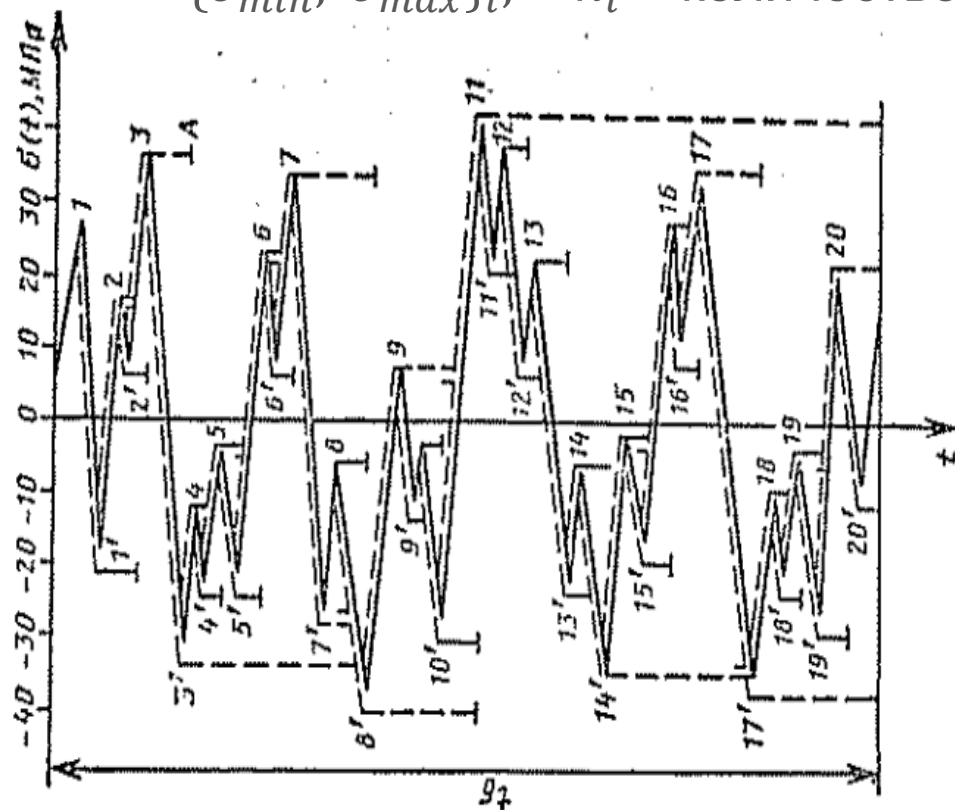
OK Cancel





## Схематизация методом «дождя» по ГОСТ 25.101-83

$\{\sigma_{min}, \sigma_{max}\}_i$ ,  $n_i$  — КОЛИЧЕСТВО ПОЛУЦИКЛОВ

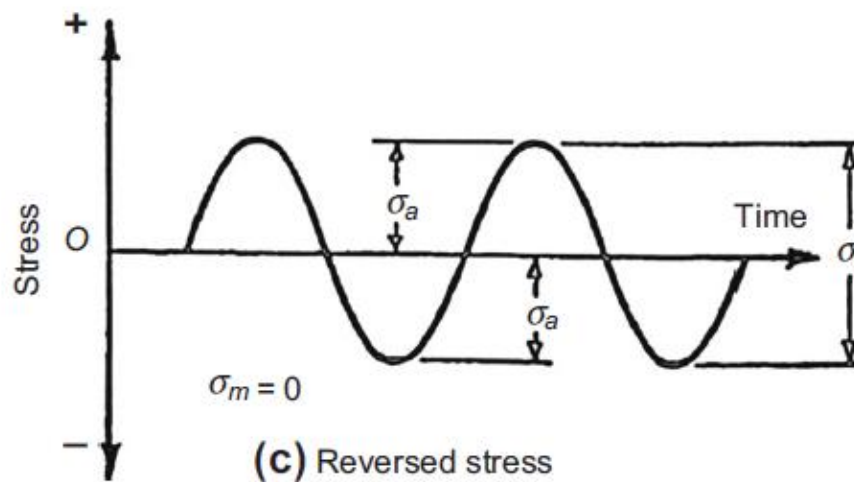
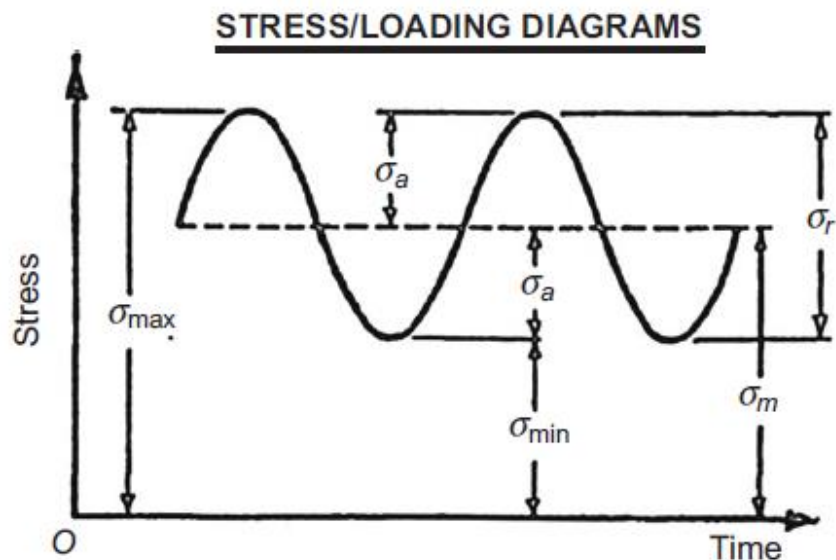




## Переход к эквивалентному симметричному циклу

Эквивалентный симметричный цикл

циклу



$$\sigma_{a \text{ eqv}} = \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m$$

Серенсен-Кинасошвили

$$\psi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$$

Коэф. асимметрии цикла

$$\sigma_{a \text{ eqv}} = \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \sigma_m$$

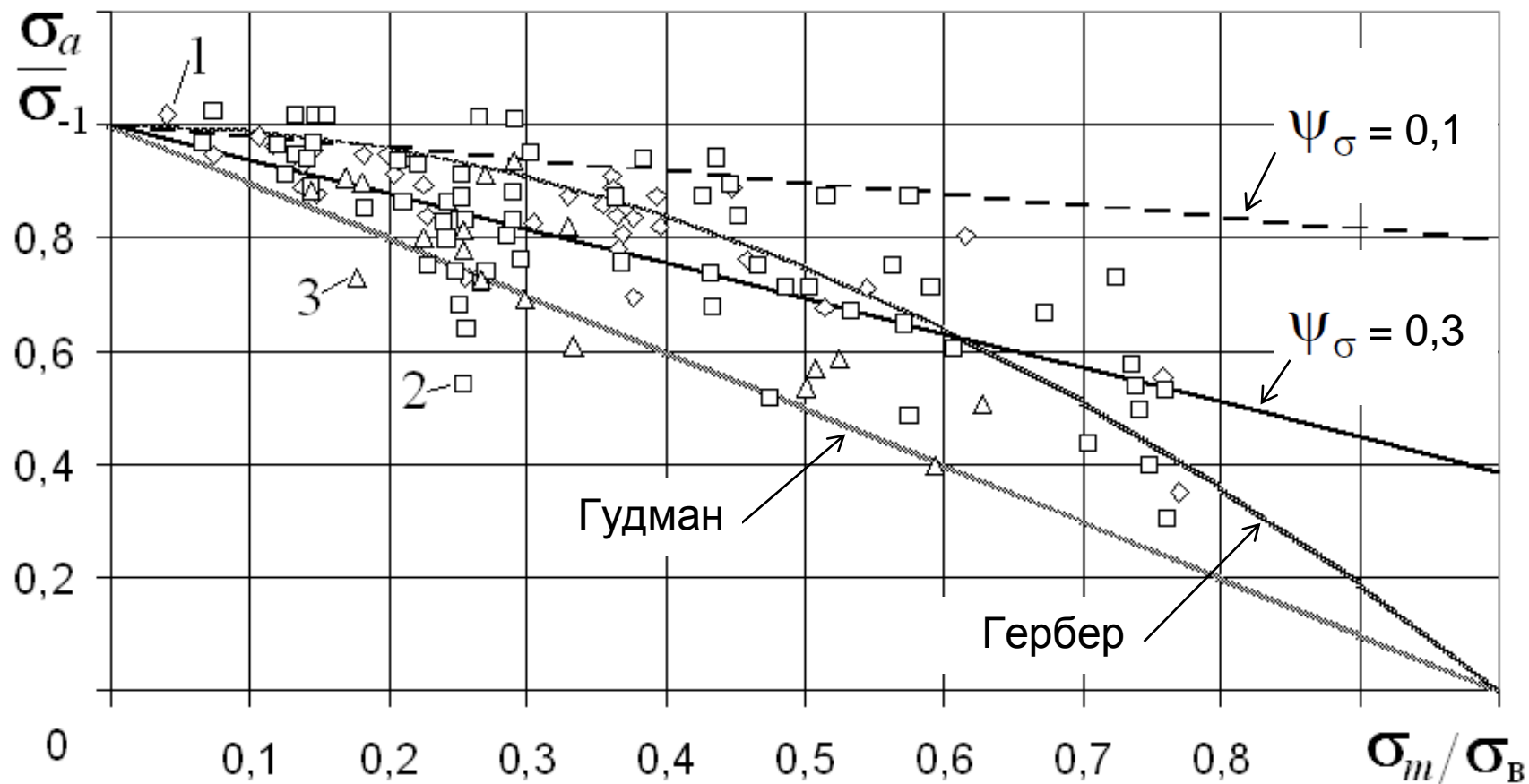
Гудман

$$\sigma_{a \text{ eqv}} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}\right)^2 (\sigma_m)^2}$$

Гербер



## Диаграмма предельных амплитуд



### Материалы:

- 1 – Сталь;
- 2 – Алюминиевые сплавы;
- 3 – Титановые и магниевые сплавы.

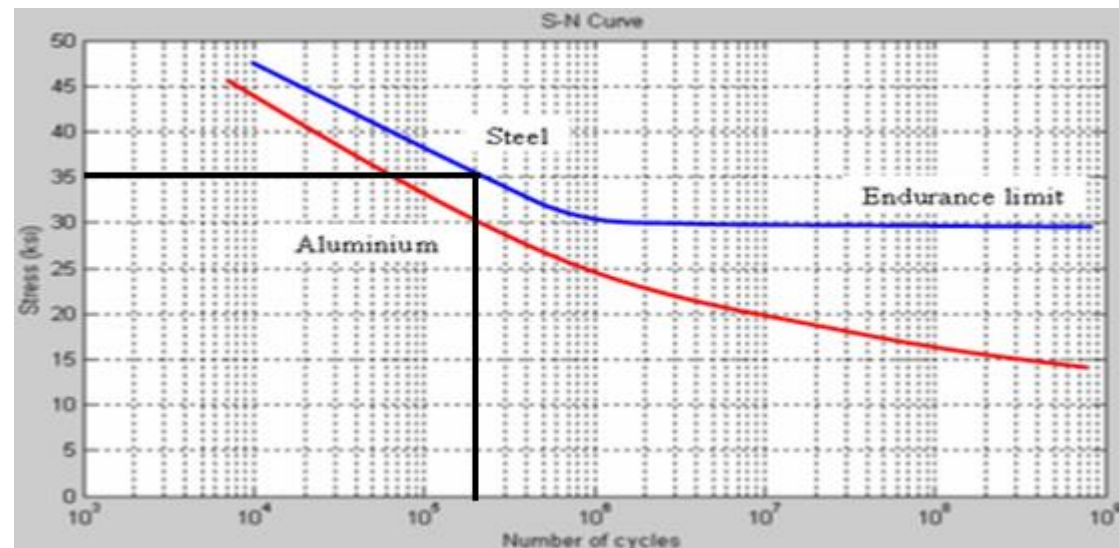




## Вычисление повреждаемости - Damage Factor

$$U_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Повреждаемость от одной циклической нагрузки

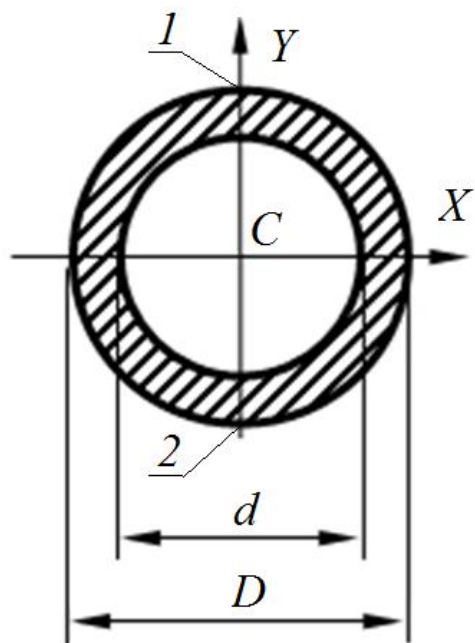
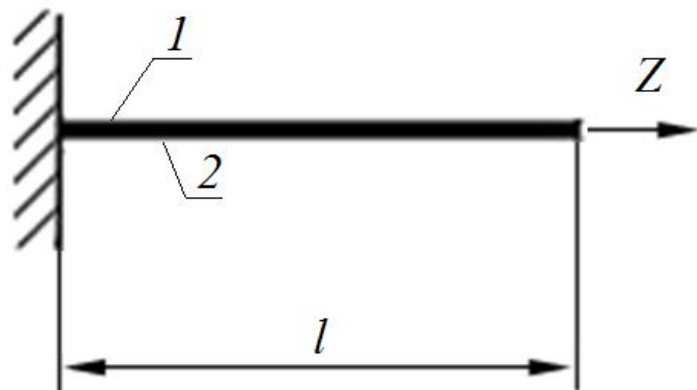


$$\sum_{i=1}^m U_i = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$$

Суммарная повреждаемость от разных циклов



## Задача на верификацию



Обозначение	Значение	Размерность	Комментарий
$D$	5.2e-2	м	внешний диаметр трубы
$d$	4.4e-2	м	внутренний диаметр трубы
$T$	4e-3	м	толщина стенки трубопровода
$D_{cp}$	4.8e-2	м	средний диаметр для пластинчатой модели
$L$	2	м	длина участка трубопровода
$E$	2e5	МПа	модуль упругости материала трубопровода
$\mu$	0.3	-	коэффициент Пуассона
$\rho$	7850	кг/м <sup>3</sup>	плотность материала трубопровода
$F_y$	-50	Н	вертикальная сила на свободном краю трубы
$F_z$	1e+4	Н	растягивающая сила на свободном краю трубы
$p$	3e+6	Па	величина избыточного внутреннего давления в трубе
$\sigma_u$	410	МПа	предел прочности
$\sigma_y$	235	МПа	предел текучести
$K_f$	1	-	коэффициент пересчёта предела выносливости



## Виды нагрузок

**F: Combination**  
 Combination  
 Time: 1, s  
 19.06.2017 12:15

- A** Fixed Support
- B** Вес: 9,8066 m/s<sup>2</sup>
- C** Izgib: 50, N
- D** Rastazhenie: 10000 N
- E** Davlenie: -3,e+006 Pa

Нагрузка

В – Вес  
 С – Изгиб  
 D – Растяжение  
 E – Давление  
 Комбинация нагрузок

ANSYS

0,000 0,225 0,450 0,675 0,900 (m)

**Загрузки**

Название	Множитель собт. веса	Вкл/Выкл	Цвет
Вес	1		
Изгиб	0		
Растяжение	0		
Давление	0		
Кручение	0		

Добавить...  
 Изменить...  
 Удалить  
 Активный  
 << ГА  
 X->Активное  
 OK

APM Structure3D



## Типы элементов виды нагрузок для верификации

№	Тип конечных элементов	Количество узлов	Количество элементов
<i>Оболочечные конечные элементы</i>			
1	Треугольные	5704	11370
2	Четырёхугольные	4752	4731
<i>Твердотельные конечные элементы</i>			
3	Тетраэдры	35193	105314
4	Гексаэдры	68160	54400

## Параметры регулярных усталостных нагружений

№ нагружения	Коеф. асимметрии $R$	Скалярный фактор	Максимум	Минимум
1	-1	11.8	11.8	-11.8
2	0	8	8	0
3	$\infty$	-13	0	-13
4	-1/2	12	12	-6





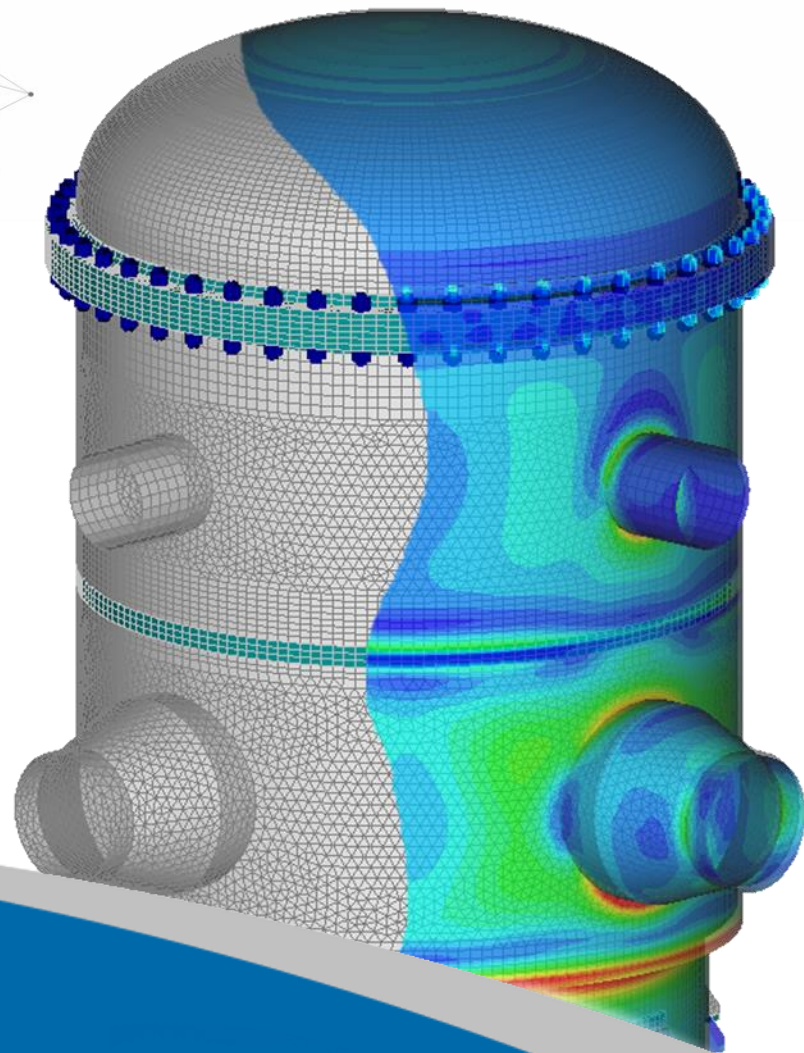
## Сравнение с Ансис

**Сравнение эквивалентных по Мизесу напряжений в МПа регулярных усталостных нагрузений для различных методов приведения к симметричной нагрузке**

№ нагружения	R	Метод	ANSYS	Structure3D	Расхождение
1	-1	-	425,40	421,30	-0,96%
2	0	SN-none	144,20	144,40	0,14%
		Зодерберг	373,23	375,00	0,47%
		Гудман	222,44	231,10	3,89%
		Гербер	164,56	165,00	0,27%
3	$\infty$	SN-none	234,33	234,80	0,20%
		Зодерберг			
		Гудман			
		Гербер	348,01	349,30	0,37%
4	-1/2	SN-none	324,46	325,00	0,17%
		Зодерберг	601,10	603,20	0,35%
		Гудман	440,71	441,90	0,27%
		Гербер	348,72	349,40	0,19%



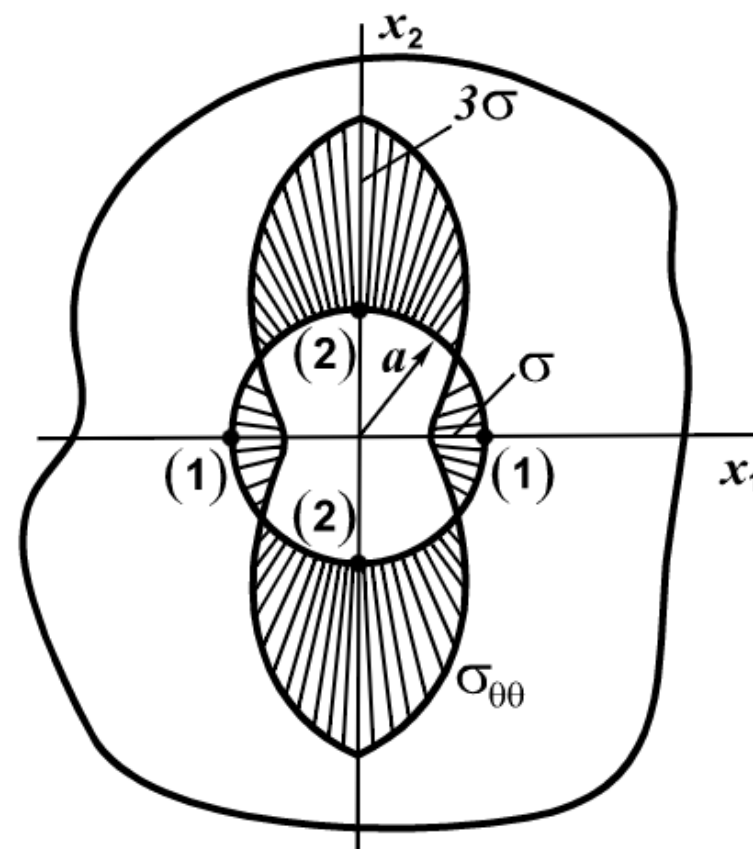
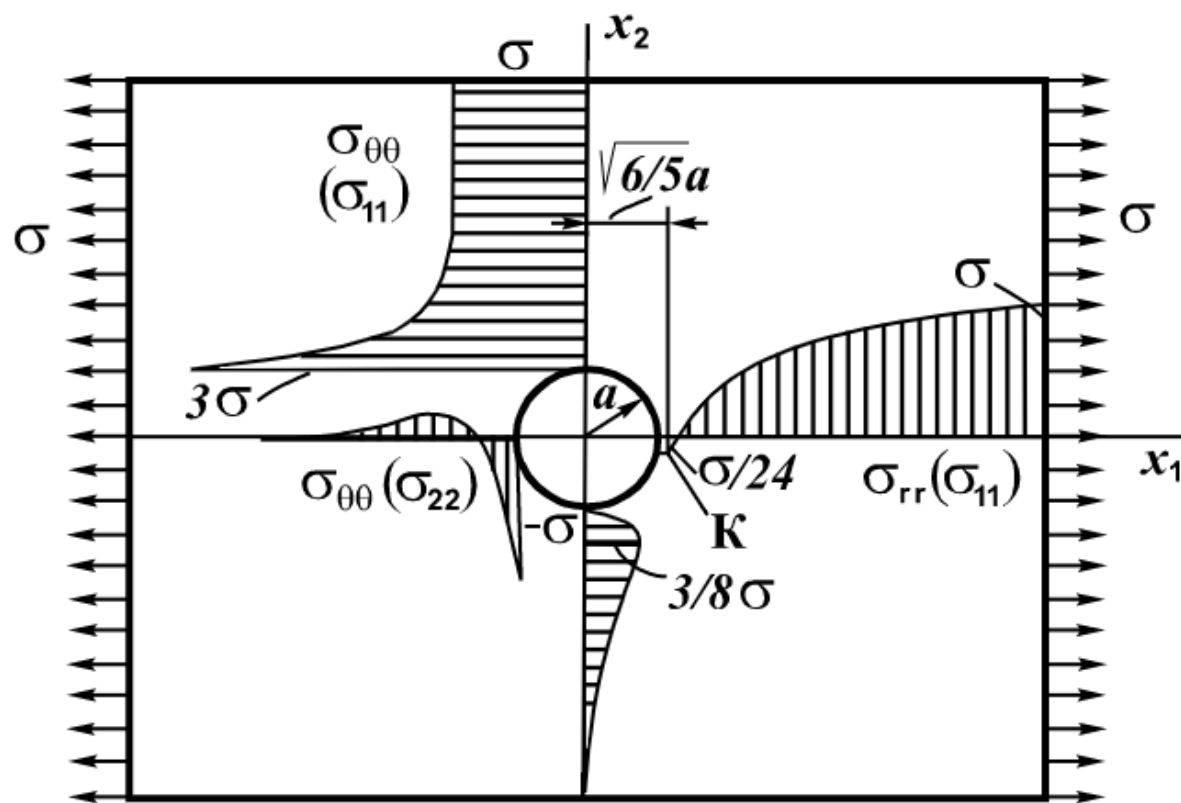
# Показ работы APM Structure3D v.17





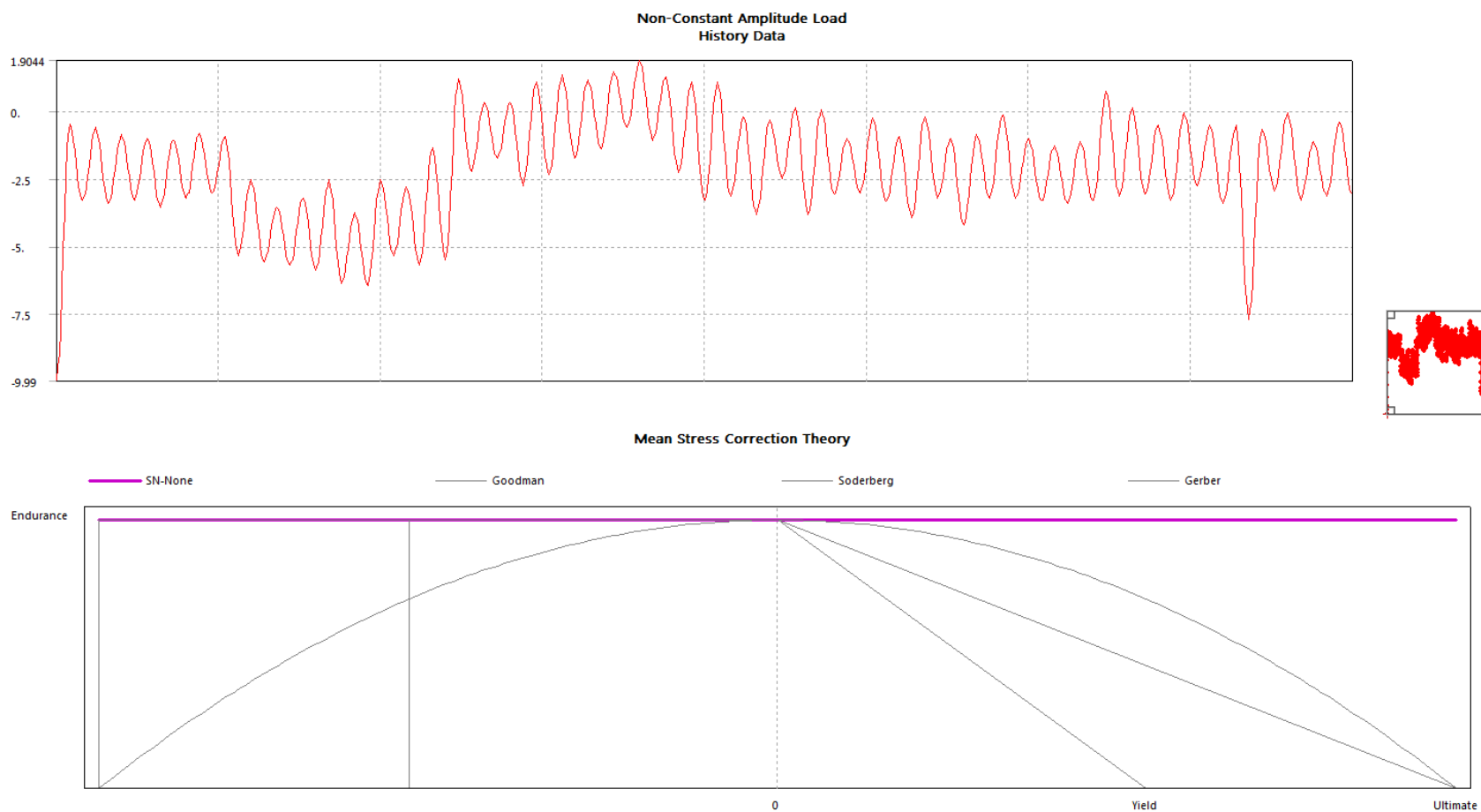
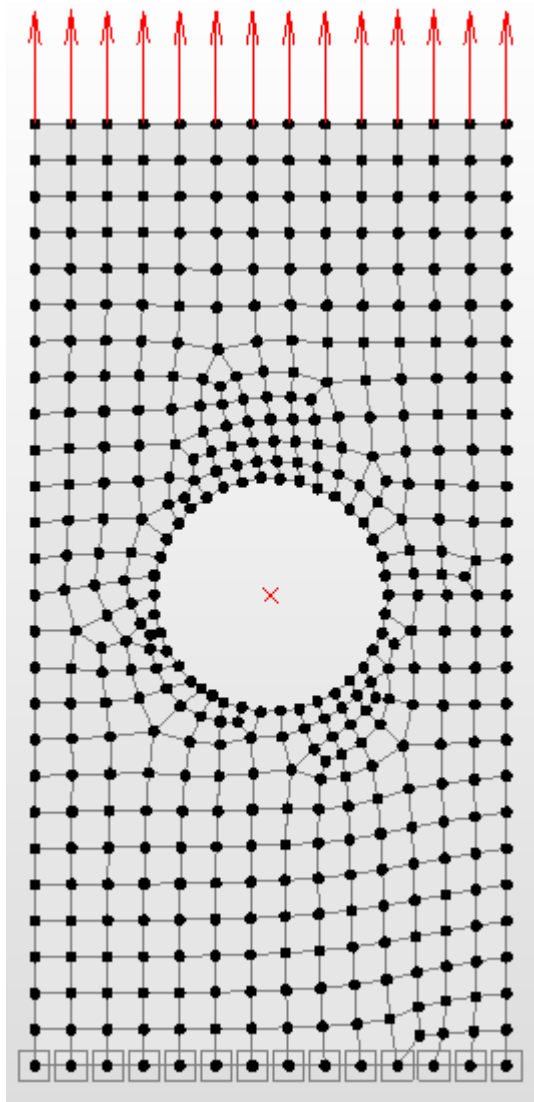
## Тестовая задача

Одностороннее растяжение пластины с малым круговым отверстием (задача Кирша)





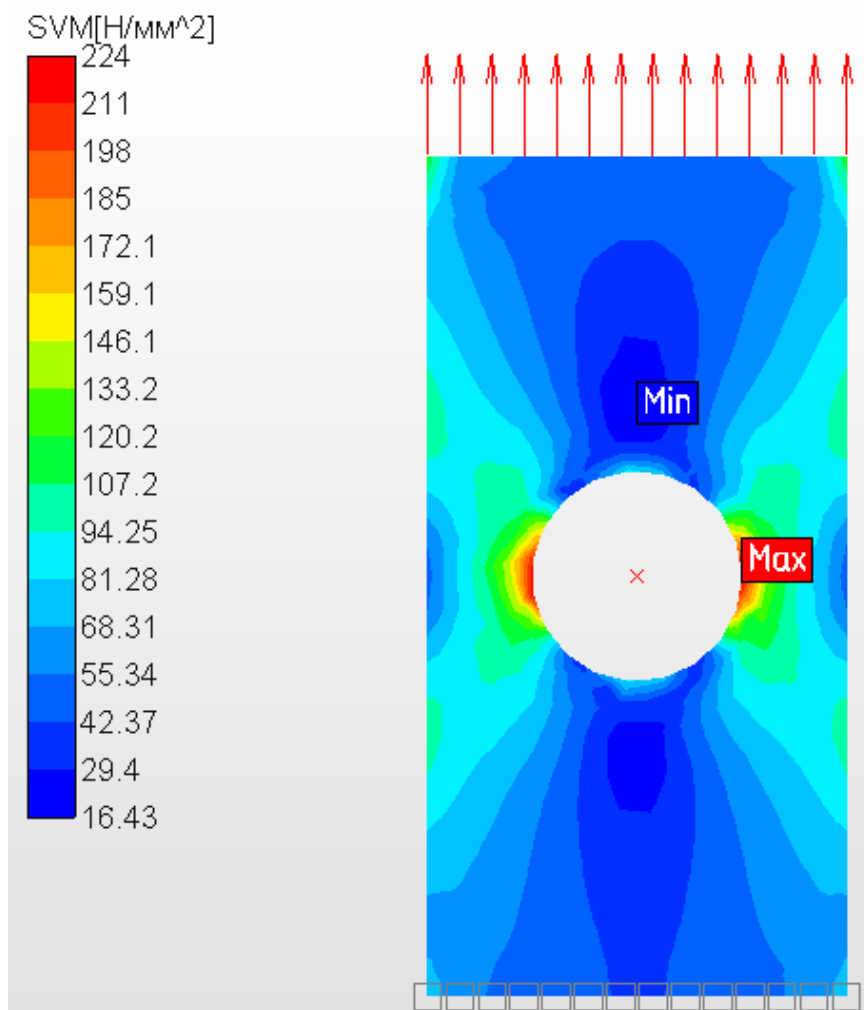
# Тестовая задача





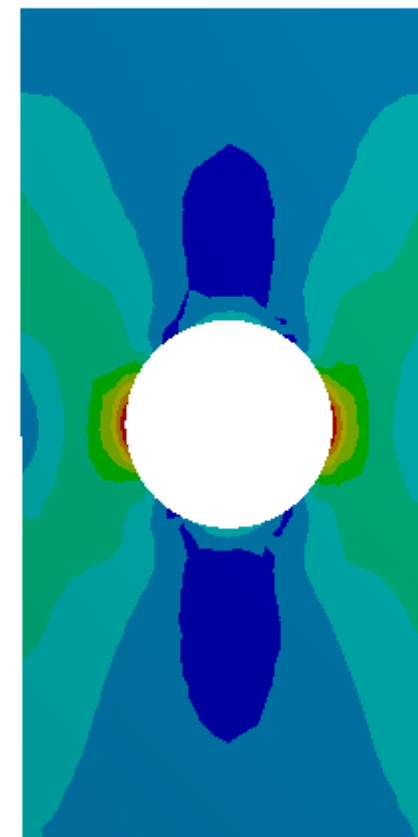


## Тестовая задача



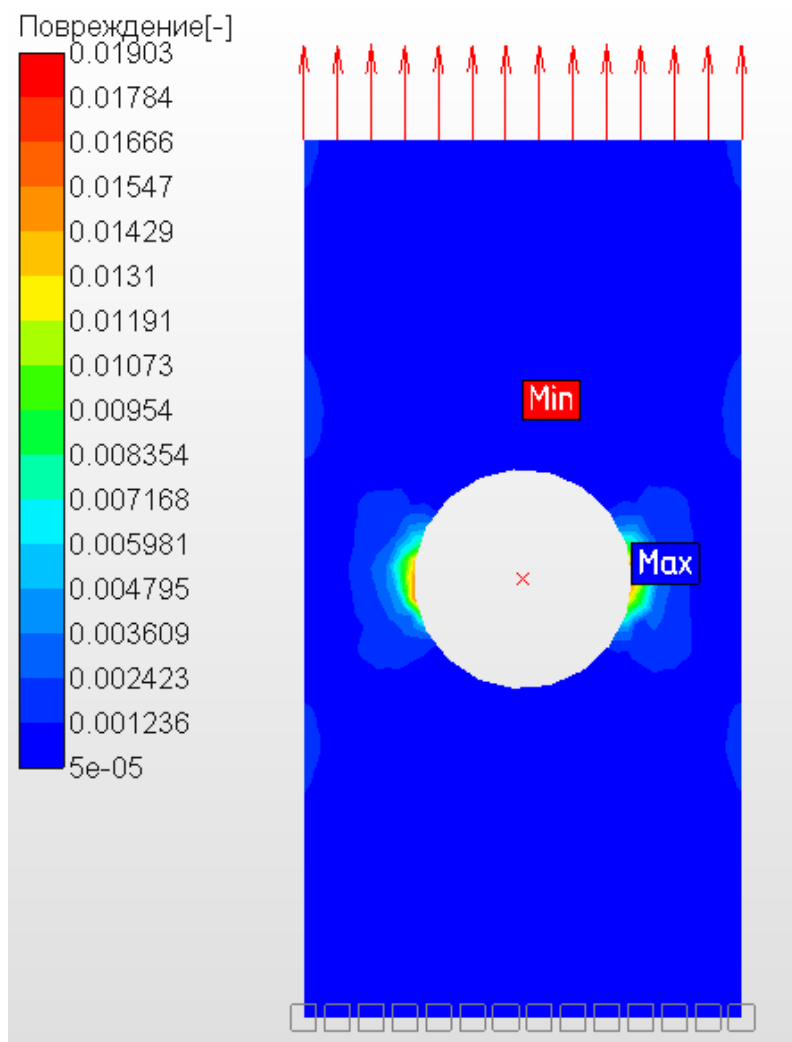
**A: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 04.05.2016 15:31

232.11 Max  
 207.84  
 183.57  
 159.3  
 135.03  
 110.77  
 86.497  
 62.228  
 37.959  
 13.691 Min

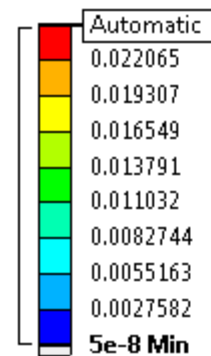




## Тестовая задача



**A: Static Structural**  
Damage  
Type: Damage  
Time: 0  
04.05.2016 15:32





## Ближайшие перспективы

- 1) Реализовать механизм просмотра для пользователя промежуточных результатов работы методов схематизации и приведения к эквивалентному симметричному циклу, по типу трёхмерных гистограмм в Ansys.
- 2) Реализованный усталостный расчёт во временной области расширить методом расчёта в частотной области на основе гармонического анализа и задаваемой пользователем спектральной плотности мощности.
- 3) Дополнить многоциклового усталостный расчёт модулем расчёта в малоциклового области, с учётом пластических деформаций.



# Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»  
(научно-технический центр)  
Московская область, г. Королев  
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6  
Тел.: (495) 120-58-10  
Internet: [www.apm.ru](http://www.apm.ru)  
E-mail: [com@apm.ru](mailto:com@apm.ru)**