

АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС

Ведущий инженер БКП-7, к.т.н. Д.В. Николаев  
Ведущий инженер БКП-7 А.А. Якушев

# Контролируемые параметры в «горячих» помещениях АЭС с РБМК

Напряжение в арматуре

Раскрытие трещин

Температура поверхностей

Напряжение в бетоне

# Техническое состояние сооружения согласно ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

**НОРМАТИВНОЕ**  
(соответствует  
проектному состоянию)

**РАБОТОСПОСОБНОЕ**  
(есть некоторые  
отклонения, которые не  
оказывают влияние на  
эксплуатацию  
сооружения)

**ОГРАНИЧЕНО-  
РАБОТОСПОСОБНОЕ**  
(есть повреждения, но  
опасности внезапного  
разрушения или потери  
устойчивости нет.  
Необходим контроль за  
техническим состоянием  
либо мероприятия  
направленные на  
устранение дефектов)

**АВАРИЙНОЕ**  
(исчерпание несущей  
способности или  
устойчивости)

# Уровни критериальных значений диагностических показателей

по:

РД 153-34.2-21.342-00 – «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений»;

РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 – «Мониторинг строительных конструкций атомных станций».

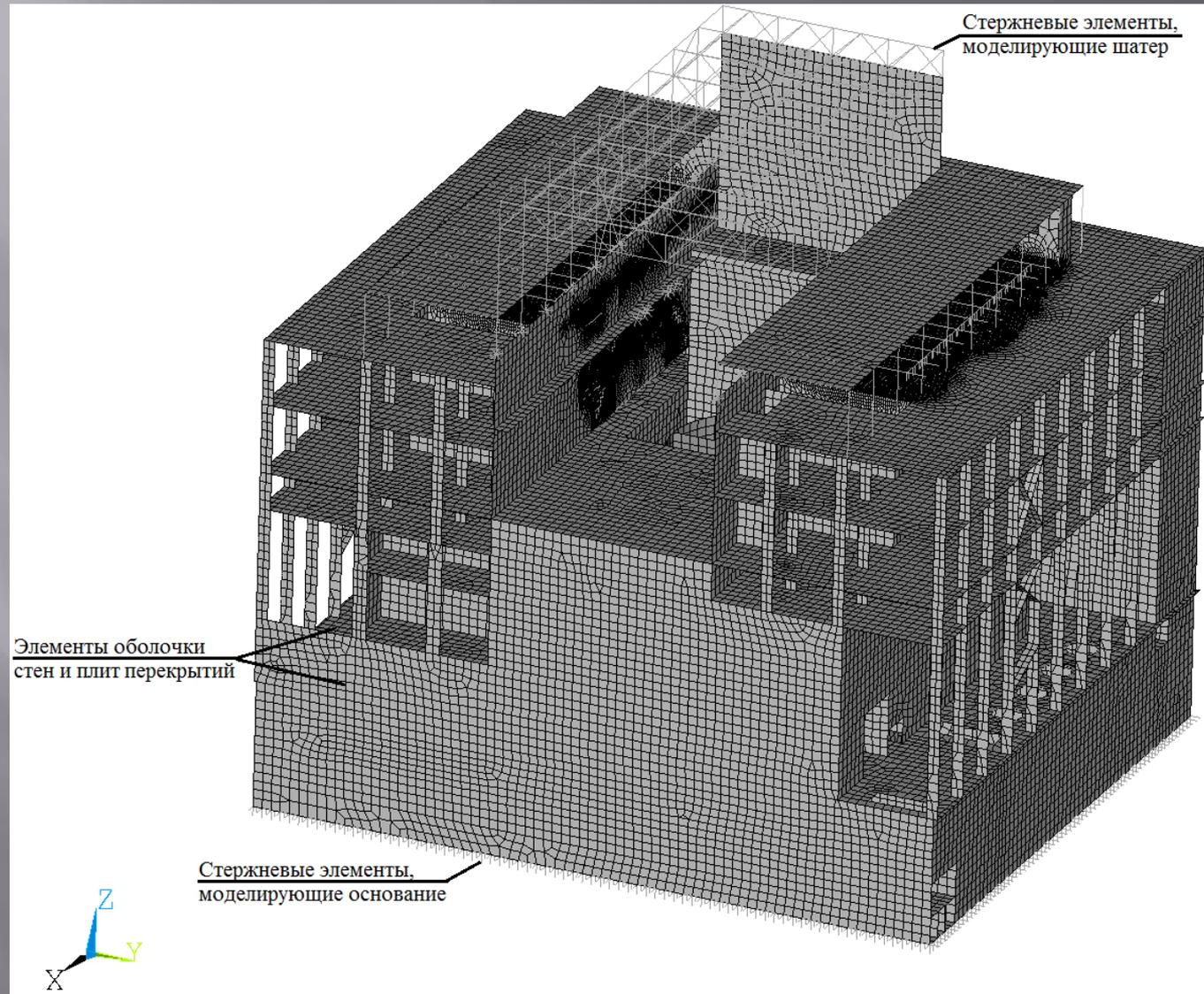
Предупреждающий  
уровень К1

Определяется на действие  
нагрузок,  
соответствующим  
условиям нормальной  
эксплуатации

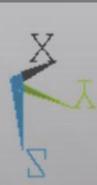
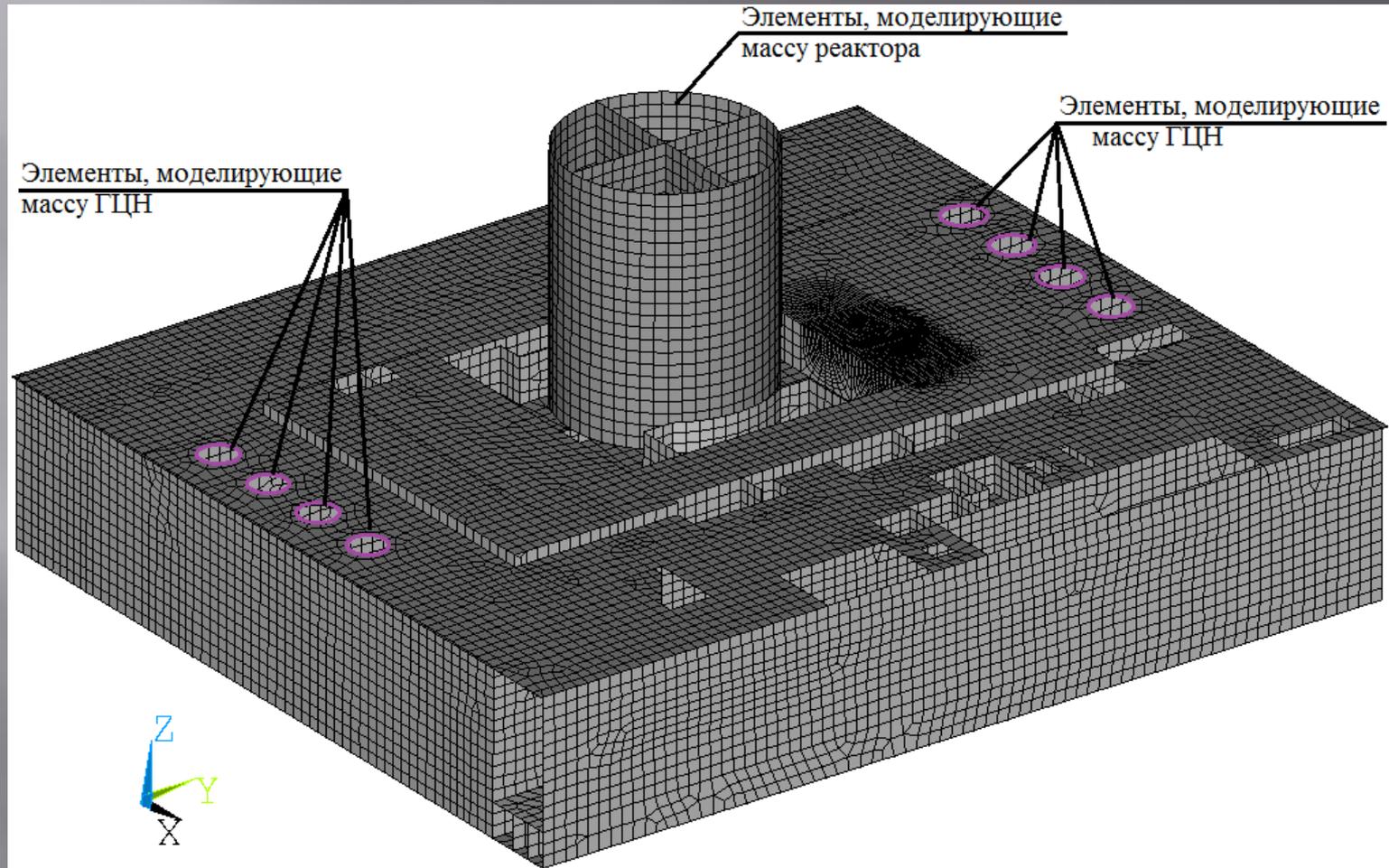
Аварийный  
(предаварийный) уровень  
К2

Определяется на действие  
нагрузок,  
соответствующим особым  
(аварийное давление,  
землетрясение, воздушная  
ударная волна и другие)

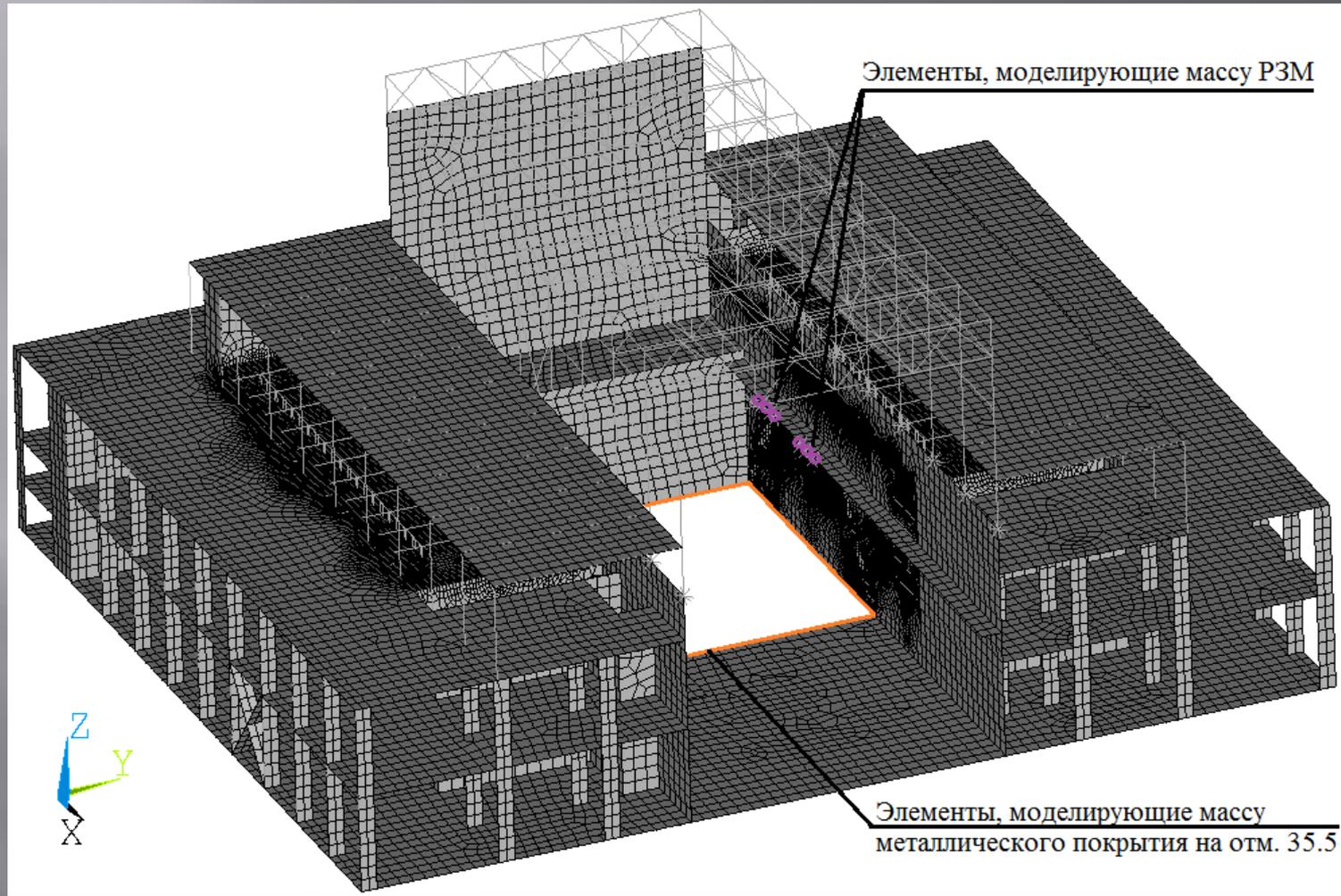
# Типовая расчетная модель блока РБМК. Общий вид



# Типовая расчетная модель блока РБМК. Строительные конструкции и оборудование ниже отм. 12.500

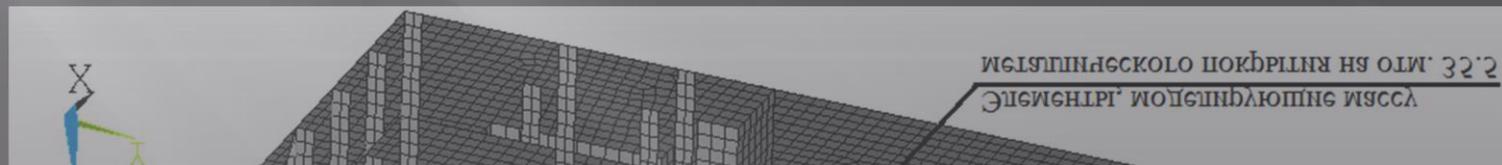
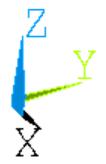


# Типовая расчетная модель блока РБМК. Строительные конструкции выше отм. 35.500



Элементы, моделирующие массу РЗМ

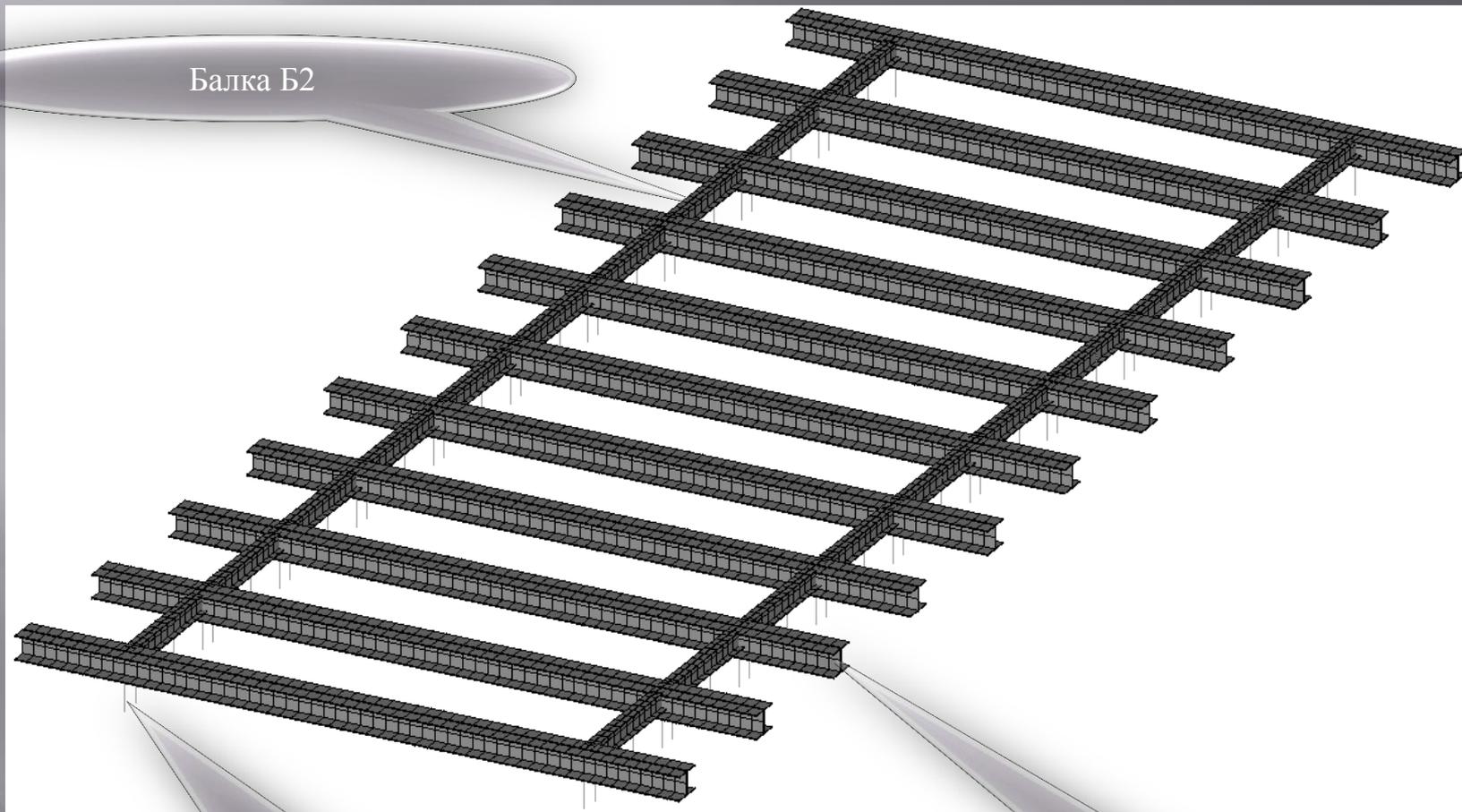
Элементы, моделирующие массу  
металлического покрытия на отм. 35.5



Элементы, моделирующие массу  
металлического покрытия на отм. 35.5



# Типовая расчетная модель блока РБМК. Система усиления помещений 804

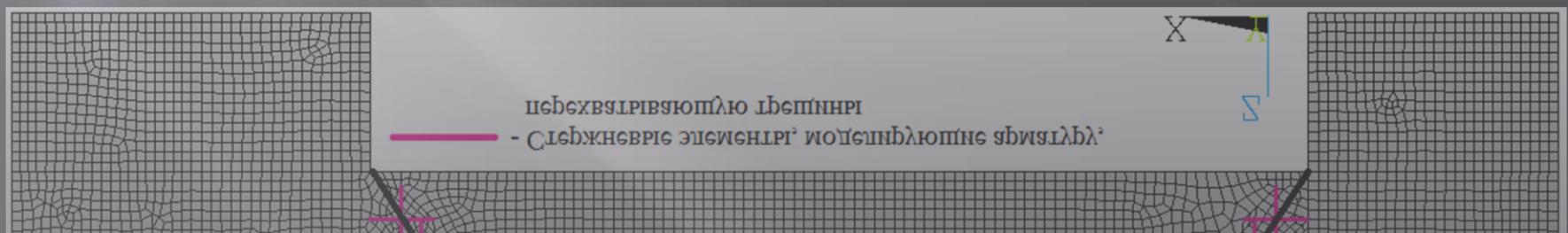
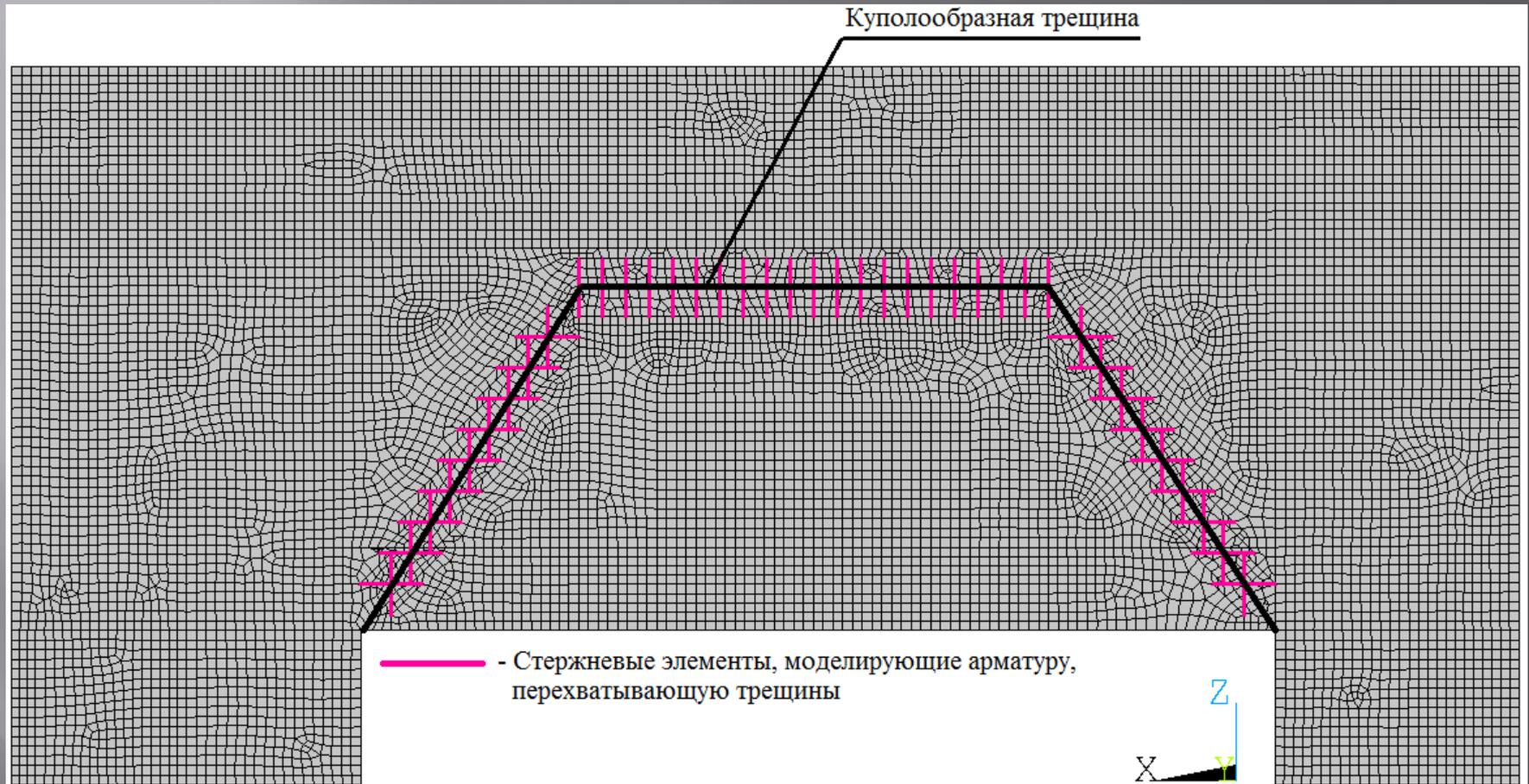


Балка Б2

Анкеры

Балка Б1

# Типовая расчетная модель блока РБМК. Моделирование трещин стен Центрального зала



# Сценарии перехода в предельное состояние

Контролируются растягивающие напряжения в арматуре

Контролируются сжимающие напряжения в арматуре.

Сценарий №1.

Прочность бетона выше проектной.

Разрыв растянутой арматуры.

Сжатая зона не разрушается.

Сценарий №2.

Прочность бетона ниже проектной.

Растянутая арматура не разрушается.

Сжатая зона разрушена.

Сценарий №3.

Сжатие в арматуре менее сжатой грани.

Разрушается бетон более сжатой грани.

## СЦЕНАРИЙ №2

Контролируется растягивающее напряжение.

Предпосылка:  $R_b < R_b^{\text{проект.}}$ ,  $\sigma_b = R_b$ .

Задача: исключить разрушение сжатой зоны.

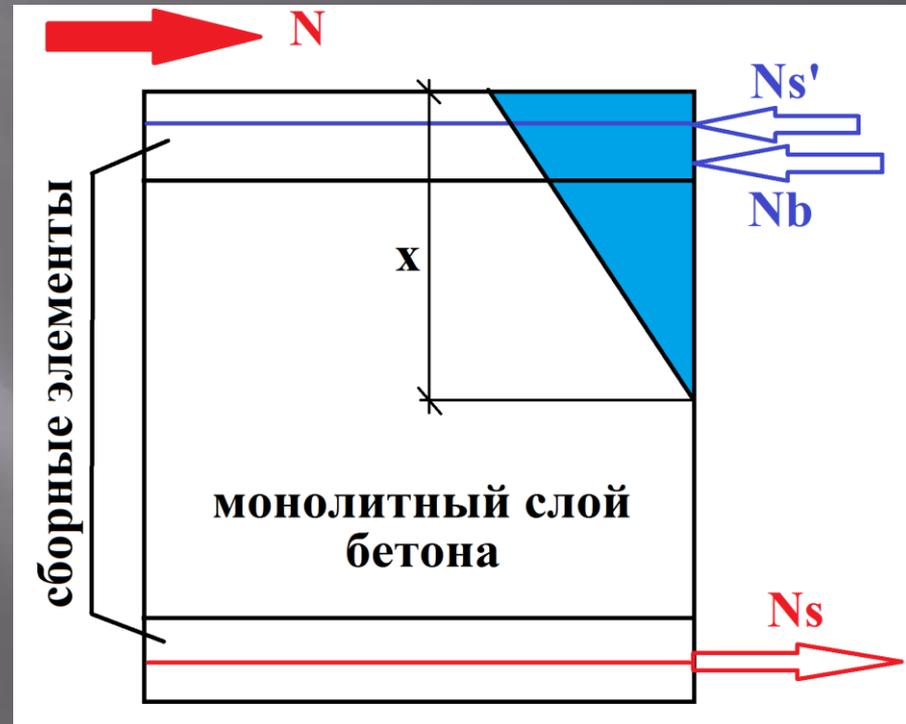
Алгоритм: 1. Определяем прочность панелей  $R_{b,p}$  и прочность бетона заполнения  $R_{b,m}$  по результатам обследования.

2. Вычисляем средневзвешенную прочность бетона  $R_{b,red}$  пропорционально площади эпюры сжатой зоны в зависимости от прочности бетона армопанелей  $R_{b,p}$  и бетона заполнения  $R_{b,m}$ .

3. Составляем систему уравнений равновесия:

$$\begin{cases} N = N_b + N'_s - N_s \\ M = M_b + M'_s + M_s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N = \frac{R_{b,red} \cdot b \cdot x}{2} + R_{b,red} \cdot \alpha_s \cdot A'_s - \sigma_s \cdot A_s \\ M = \frac{R_{b,red} b x}{2} \cdot \frac{2x}{3} + R_{b,red} \alpha_s A'_s (x - a') + \sigma_s A_s (h_0 - x) \end{cases} \quad (1')$$



$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{b,\tau,red}} \quad (2) \quad E_{b,\tau} = \frac{E_{b,red}}{1-\varphi_{b,cr,red}} \quad (3)$$

4. Итерационно решаем систему (1') относительно  $x$  и  $\sigma_s$ , на каждом шаге уточняя  $R_{b,red}$  и не допуская превышения предельной высоты сжатой зоны  $x_R$ :

$$x_R = \frac{N + R_s A_s \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_s A'_s}{R_b b + \frac{2R_s A_s}{h_0(1 - \xi_R)}}, \quad (4)$$

Полученное значение  $\sigma_s$  является аварийным критерием К2.

5. Определяем предупреждающий критерий К1, вычитая из К2 значения напряжения от сейсмического воздействия и аварийного давления:

$$K1 = K2 - \sigma_{seism} - \sigma_{press} \quad (5)$$

Напряжение в арматуре от сейсмического воздействия  $\sigma_{seism}$  и аварийного давления  $\sigma_{press}$  определяем с помощью расчетной модели.

# СЦЕНАРИЙ №3

Контролируется сжимающее напряжение.

Предпосылка:  $\sigma_b = R_b, \varepsilon_s = \varepsilon_b$ .

Задача: определить предельное напряжение в сжатой арматуре.

Алгоритм: 1. Определяем прочность панелей  $R_{b,p}$  и прочность бетона заполнения  $R_{b,m}$  по результатам обследования.

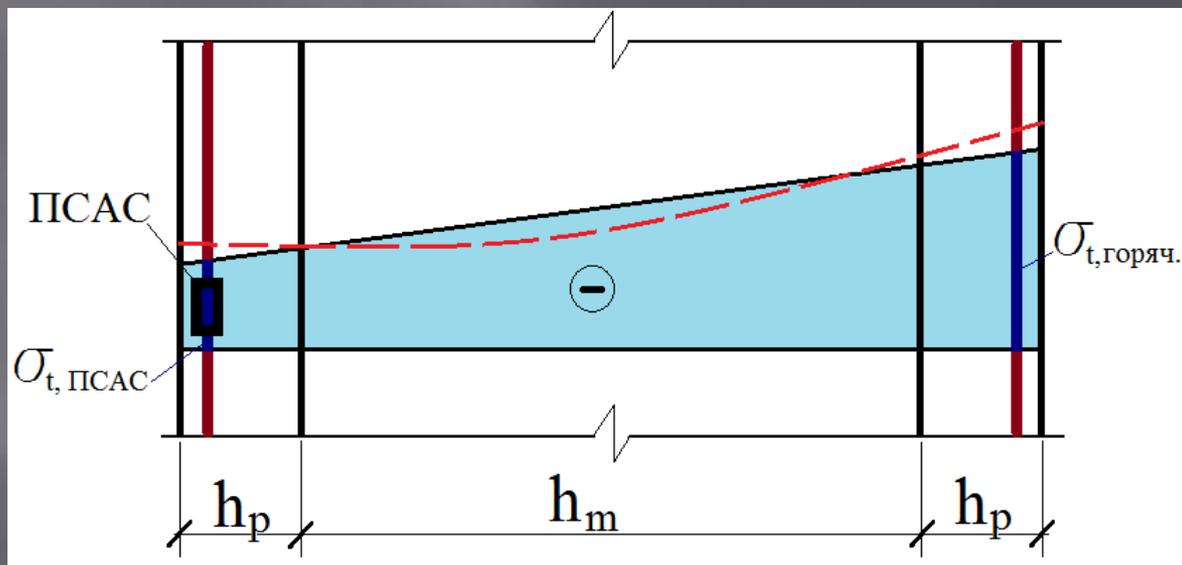
2.1 Определяем начальные модули упругости бетона ( $E_{b,p}$  и  $E_{b,m}$ ) и коэффициенты ползучести ( $\varphi_{b,cr,p}$  и  $\varphi_{b,cr,m}$ ) по СП 63.133300.2012 в зависимости от прочности бетона.

2.2 Определяем длительные модули деформации бетона по формуле (3).

3. Так как значения напряжений со стороны где установлен датчик ПСАС по модулю меньше напряжений со стороны «горячих» помещений, вводим коэффициент неравномерности сжимающих напряжений:

$$k_n = \frac{\sigma_{t,горяч.} + \sigma_{press}}{\sigma_{t,ПСАС} - \sigma_{press}} \quad (6)$$

Температурные напряжения и напряжение от аварийного давления определяются с помощью расчетной модели или аналитически.



4. Определяем аварийный критерий K2 без учета усадки и ползучести бетона заполнения, используя предпосылки  $\varepsilon_b = \varepsilon_s$  и  $\sigma_b = R_b$ :

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_b = E_s \frac{R_{b,m}}{E_{b,\tau,m} \cdot k_n} \quad (7)$$

5. Определяем напряжение в бетоне заполнения от его усадки с учетом уменьшения за счет ползучести, используя методику разработанную д.т.н. А.Б. Голышевым:

$$\sigma_{b,m} = \frac{0.5\alpha_y}{h_m \frac{1}{2h_p E_{b,p}} + \frac{1}{E_{b,m}} \left(1 + \frac{\varphi_{b,cr,m}}{4}\right)}, \quad (8)$$

6. Определяем напряжения в арматуре от усадки бетона заполнения:

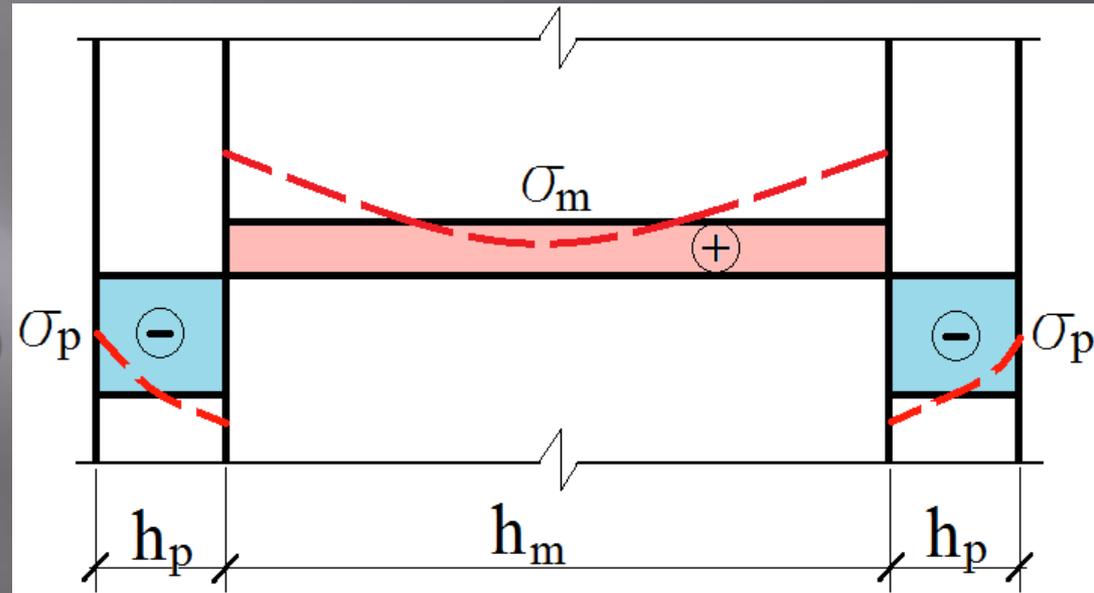
$$\sigma_{s,p} = \sigma_{b,m} \frac{h_m}{2h_p} \cdot \frac{E_s}{E_{b,p}} \quad (9)$$

7. Определяем аварийный критерий K2 с учетом усадки и ползучести бетона заполнения:

$$K2 = \sigma_s + \sigma_{s,p} \quad (10)$$

8. Определяем предупреждающий критерий K1, вычитая из K2 значения напряжения от сейсмического воздействия и аварийного давления:

$$K1 = K2 - \sigma_{seism} - \sigma_{press} \quad (11)$$



# БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$R_b$  - расчетное сопротивление бетона на осевое сжатие;

$R_s$  - расчетное сопротивление арматуры;

$\sigma_b, \sigma_s$  - нормальные напряжения в бетоне и в арматуре, соответственно;

$\xi_R, x_R$  - предельная высота сжатой зоны относительная и абсолютная, соответственно;

$\varepsilon_b, \varepsilon_s$  - относительные деформации бетона и арматуры, соответственно;

$\alpha_y$  - мера ползучести;

$A_s, A'_s$  - площади сечения арматуры  $S$  и  $S'$ , соответственно;

$b, h$  - ширина и высота поперечного сечения, соответственно;

$K1, K2$  - предупреждающий и аварийный (предаварийный) уровни критериев, соответственно;

$\sigma_{seism}$  - напряжения в арматуре от сейсмического воздействия;

$\sigma_{press}$  - напряжения в арматуре от аварийного давления;

$N, M$  - нормальная сила и изгибающий момент, соответственно;

$\varphi_{b,cr}$  - коэффициент ползучести бетона;

$\sigma_{t,PCAC}, \sigma_{t,горяч.}$  - нормальные напряжения в арматуре от температуры со стороны установки ПСАС и со стороны «горячего» помещения, соответственно;

$k_n$  - коэффициент неравномерности сжимающих напряжений;

$E_s$  - модуль упругости арматуры;

$E_b$  - начальный модуль упругости бетона при сжатии;

$E_{b,\tau}$  - длительный модуль деформации бетона;

# ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ

m – монолитный бетон (бетон заполнения);

p – армопанель;

red – приведенный.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**