



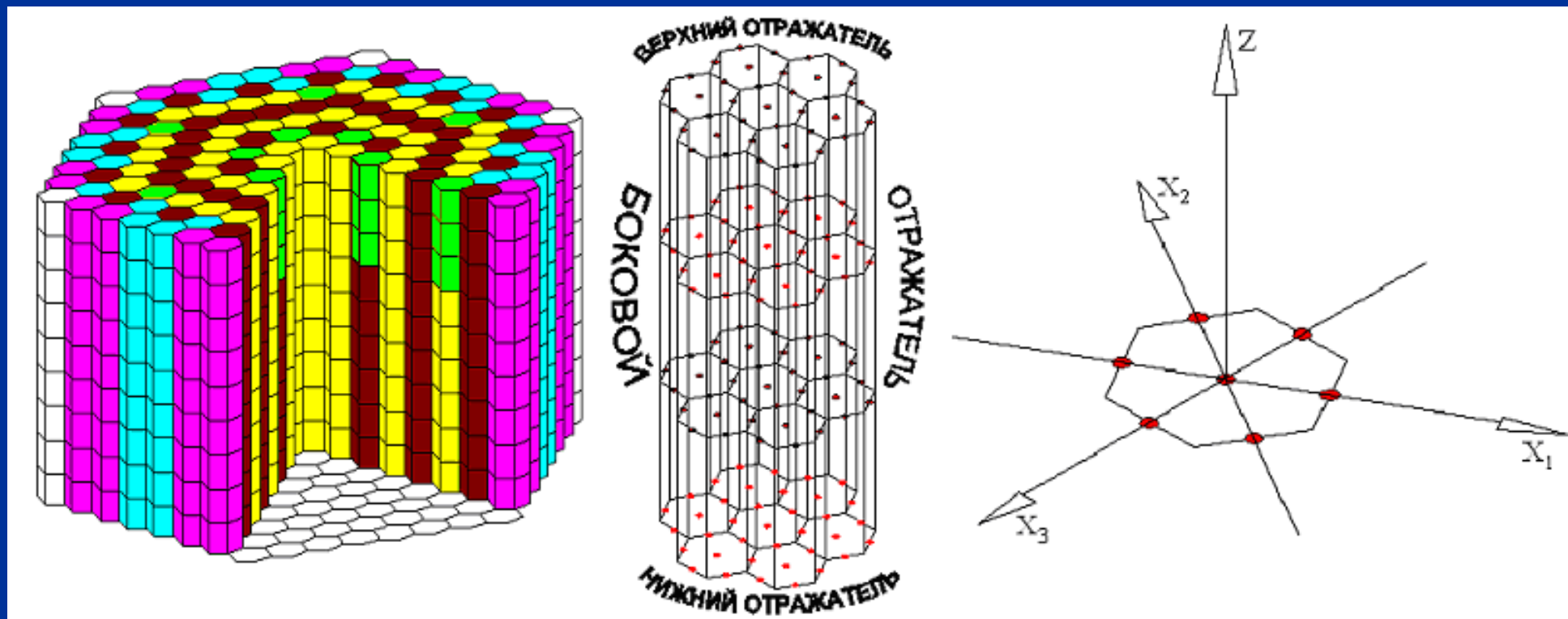
Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору
Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»



*Разработка многогрупповой физической модели для
моделирования динамики активной зоны РУ типа БН на
основе ПС Rainbow-TRP*

Кавун О.Ю. , Кавун В.О., Семишин В.В.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА АКТИВНОЙ ЗОНЫ



- ✓ Число каналов – до **2800**;
- ✓ Число энергетических групп нейтронов – до **31**;
- ✓ Число групп запаздывающих нейтронов – до **31**;
- ✓ Число групп источников остаточных энерговыделений – до **31**.

Уравнение кинетики в диффузионном приближении

$$\frac{1}{v_n} \frac{d\Phi_n}{dt} = \nabla(D_n \nabla(\Phi_n)) + \chi_n \Psi(1 - \beta) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{m \rightarrow n}} \Phi_m - (\Sigma_{a_n} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{n \rightarrow m}}) \Phi_n + \sum_{p=1}^P \chi_n \lambda_p C_p$$

где n, m – номер энергетической группы; N – число энергетических групп, $10 \geq N \geq 2$;

$\Phi_{n(m)}$ – поток нейтронов в группе n (m); v_n – скорость нейтронов в n -й группе;

t – время; χ_n – доля делений в n -ю группу; $\Psi = \sum_{m=1}^N v_{f_m} \Sigma_{f_m} \Phi_m$ – источник нейтронов;

v_{f_m} – выход нейтронов на один акт деления в m -й группе; Σ_{f_m} – сечения деления в m -й группе;

Σ_{a_n} – сечение поглощения в n -й группе;

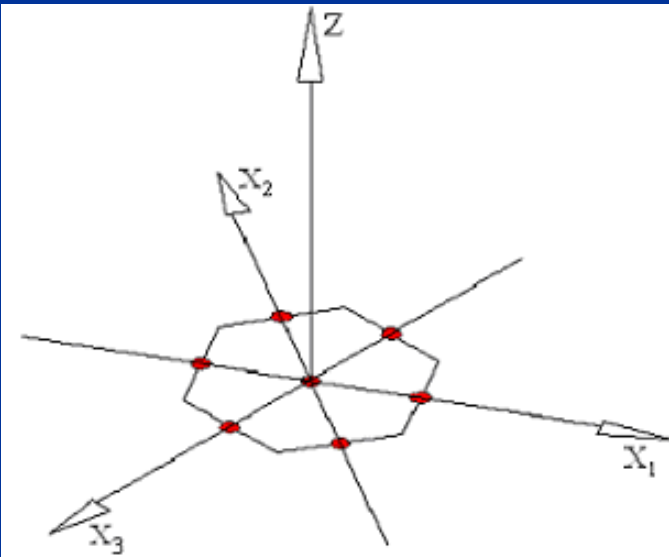
$\Sigma_{S_{n(m) \rightarrow m(n)}}$ – сечение рассеяния из группы n (m) в группу m (n);

$\beta = \sum_{p=1}^P \beta_p$ – доля запаздывающих нейтронов; P – число групп запаздывающих нейтронов;

λ_p – постоянная распада источника запаздывающих нейтронов группы p ;

C_p – концентрация источников запаздывающих нейтронов группы p .

Уравнение для потока нейтронов в центре расчетной ячейки

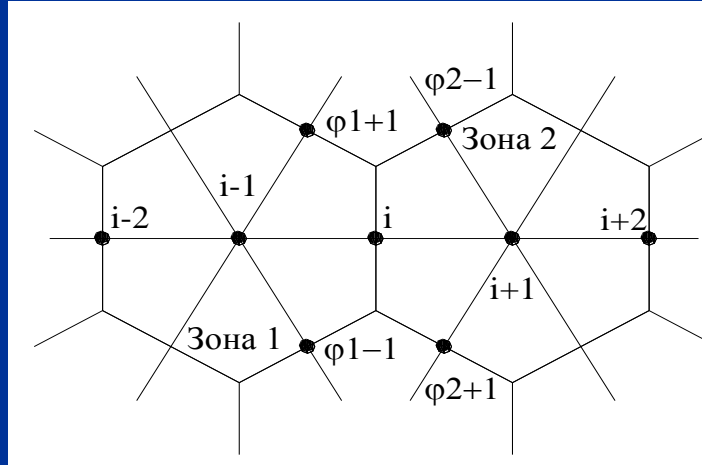


$$\Phi \left(\frac{3}{2D\nu\Delta t} + \hat{B}_{z1}^2 + \frac{4}{H^2} + \frac{\Sigma_a + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{n \rightarrow m}} - \chi(1-\beta)\nu_f \Sigma_f}{D} \right) - \frac{1}{D} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Phi_m (\chi(1-\beta)\nu_{f_m} \Sigma_{f_m} + \Sigma_{S_{m \rightarrow n}}) =$$

$$= \frac{2}{3H^2} (\Phi_{i+1} + \Phi_{i-1} + \Phi_{j+1} + \Phi_{j-1} + \Phi_{k+1} + \Phi_{k-1}) + \hat{B}_{z2}^2 + \frac{\chi \sum_{p=1}^P \lambda_p C_p}{D} + \frac{4\Phi_{t-1} - \Phi_{t-2}}{2\nu D \Delta t},$$

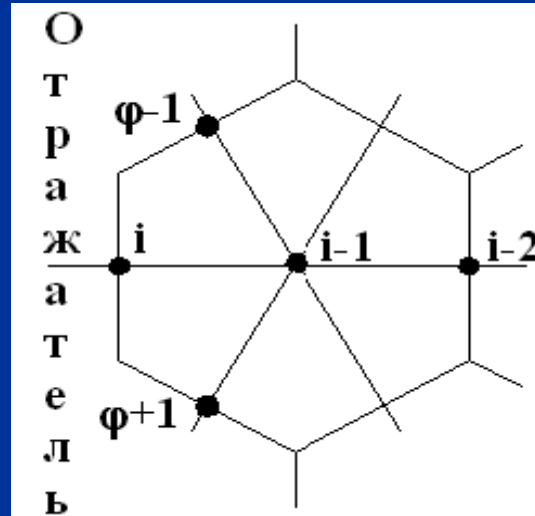
$$\hat{B}_z = \nabla(D(\nabla\Phi))|_z = -\hat{B}_{z1}^2 \Phi_l + \hat{B}_{z2}^2.$$

Уравнение для потока нейтронов в точке на границе между кассетами



$$\begin{aligned}
 & \Phi \left(\frac{3}{2\Delta t} \left(\frac{1}{v_1 D_1} + \frac{1}{v_2 D_2} \right) + \frac{1}{D_1} \left(\Sigma_a + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{n \rightarrow m}} - \chi(1-\beta) v_f \Sigma_f \right) \right) \Big|_1 + \frac{1}{D_2} \left(\Sigma_a + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{n \rightarrow m}} - \chi(1-\beta) v_f \Sigma_f \right) \Big|_2 + \\
 & + \frac{15}{4\Delta r^2} \left(\frac{D_1}{D_2} + \frac{D_2}{D_1} \right) + \frac{10}{4\Delta r^2} + \frac{4}{\Delta r^2 \Delta \varphi^2} + \hat{B}_{z1(1)}^2 + \hat{B}_{z1(2)}^2 - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Phi_m \left(\frac{\chi(1-\beta) v_f \Sigma_f \Sigma_{f_m} + \Sigma_{S_{m \rightarrow n}} \Big|_1}{D_1} + \frac{\chi(1-\beta) v_f \Sigma_f \Sigma_{f_m} + \Sigma_{S_{m \rightarrow n}} \Big|_2}{D_2} \right) = \\
 & = \Phi_{i+1} \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{5}{\Delta r^2} \frac{D_2}{D_1} \right) + \Phi_{i+2} \left(\frac{1}{4\Delta r^2} - \frac{5}{4\Delta r^2} \frac{D_2}{D_1} \right) + \Phi_{i-1} \left(\frac{5}{\Delta r^2} \frac{D_1}{D_2} + \frac{1}{\Delta r^2} \right) + \Phi_{i-2} \left(\frac{1}{4\Delta r^2} - \frac{5}{4\Delta r^2} \frac{D_1}{D_2} \right) + \\
 & + \frac{\Phi_{\varphi+1} + \Phi_{\varphi-1} + \Phi_{\varphi+2} + \Phi_{\varphi-2}}{\Delta r^2 \Delta \varphi^2} + \frac{4\Phi_{t-1} - \Phi_{t-2}}{2\Delta t} \left(\frac{1}{D_1 v_1} + \frac{1}{D_2 v_2} \right) + \hat{B}_{z2(1)}^2 + \hat{B}_{z2(2)}^2 + \left(\chi \sum_{p=1}^P \lambda_p C_p \right) \Big|_1 + \left(\chi \sum_{p=1}^P \lambda_p C_p \right) \Big|_2.
 \end{aligned}$$

Уравнение для потока нейтронов в точке на границе с радиальным отражателем



$$\Phi \left(\frac{3}{2\nu\Delta t D} + \frac{\Sigma_a + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Sigma_{S_{n \rightarrow m}} - \chi(1-\beta)\nu_f \Sigma_f}{D} + \frac{5}{4\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta r^2 \Delta \varphi^2} + \hat{B}_{z1}^2 \right) - \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \Phi_m (\Sigma_{S_{m \rightarrow n}} + \chi(1-\beta)\nu_{f_m} \Sigma_{f_m})}{D} =$$

$$= \frac{4\Phi_{i-1} - \Phi_{i-2}}{2\nu\Delta t D} + \frac{5\alpha}{2\Delta r D} + \frac{\chi}{D} \sum_{p=1}^P \lambda_p C_p + \frac{\Phi_{i-1}}{\Delta r^2} + \frac{\Phi_{i-2}}{4\Delta r^2} + \frac{\Phi_{\varphi+1} + \Phi_{\varphi-1}}{r^2 \Delta \varphi^2} + \hat{B}_{z2}^2,$$

где $\alpha = \left. \frac{d\Phi_n}{dr} \right|_{r=0}^{\hat{i}\hat{o}\hat{\delta}}$ - производная потока в точке на границе с отражателем.

Уравнения для оператора утечки по высоте активной ЗОНЫ

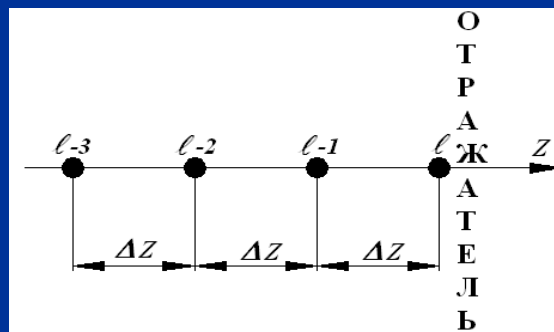
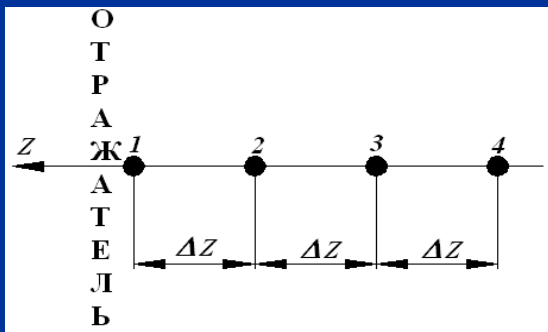
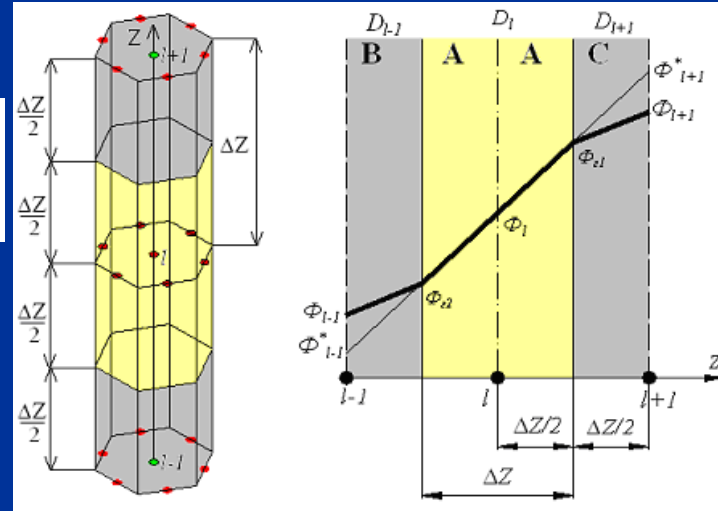
$$\hat{B}_z^2 = \nabla(D(\nabla\Phi))|_z = -\hat{B}_{z1}^2 \Phi_l + \hat{B}_{z2}^2$$

✓ Для точек внутренних точек:

$$\hat{B}_{z1}^2 = \frac{2}{\Delta z^2} \left(\frac{D_{l+1}}{D_l + D_{l+1}} + \frac{D_{l-1}}{D_l + D_{l-1}} \right); \hat{B}_{z2}^2 = \frac{2}{\Delta z^2} \left(\frac{\Phi_{l+1} D_{l+1}}{D_l + D_{l+1}} + \frac{\Phi_{l-1} D_{l-1}}{D_l + D_{l-1}} \right).$$

✓ Для точек на границе с нижним отражателем:

$$\hat{B}_{z1}^2 = \frac{1}{\Delta z^2}; \hat{B}_{z2}^2 = \frac{1}{\Delta z^2} \left(\Phi_3 + \frac{\Phi_2 - \Phi_4}{4} \right) + \frac{\alpha}{D} \left(\frac{3}{2\Delta z} + \frac{3D_1 - 4D_2 + D_3}{2D\Delta z} \right).$$



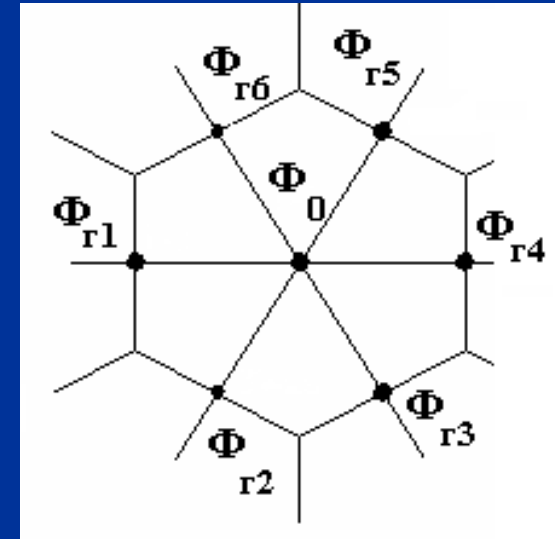
✓ Для точек на границе с верхним отражателем:

$$\hat{B}_{z1}^2 = \frac{1}{\Delta z^2}; \hat{B}_{z2}^2 = \frac{1}{\Delta z^2} \left(\Phi_{l-2} + \frac{\Phi_{l-1} - \Phi_{l-3}}{4} \right) + \frac{\alpha}{D} \left(\frac{3}{2\Delta z} + \frac{3D_l - 4D_{l-1} + D_{l-2}}{2D\Delta z} \right).$$

Усреднение потока нейтронов в ячейке и запаздывающие нейтроны

✓ Усреднение потока в пределах ячейки:

$$\bar{\Phi} = \frac{\Phi_{\tilde{a}1} + \Phi_{\tilde{a}2} + \Phi_{\tilde{a}3} + \Phi_{\tilde{a}4} + \Phi_{\tilde{a}5} + \Phi_{\tilde{a}6} + 5\Phi_0}{16} + \frac{5\Phi_0}{8}$$



Концентрация источников запаздывающих нейтронов:

$$C = \frac{\frac{4C_{t-1} - C_{t-2}}{2\Delta t} + \beta_p \Psi}{\frac{3}{2\Delta t} + \lambda_p};$$

$$\Psi_i = \sum_{m=1}^N \nu_{f_m} \Sigma_{f_m} \bar{\Phi}_m X_i$$

Уравнение относительного энерговыделения

$$Q_V = \frac{\bar{Q}_V}{\bar{Q}} \left((1 - \delta) \sum_{m=1}^N \sum_{f_m} \bar{\Phi}_m + \sum_{g=1}^G \mathcal{G}_g \mu_g \right)$$

где \bar{Q}_V - среднее по зоне объемное энерговыделение;

$$\bar{Q} = \frac{\int \sum_{m=1}^N \sum_{f_m} \bar{\Phi}_m dv}{\int dv} - \text{стационарное среднее по зоне число делений};$$

G – число групп источников остаточных энерговыделений;

$$\delta = \sum_{g=1}^G \delta_g - \text{доля остаточных энерговыделений};$$

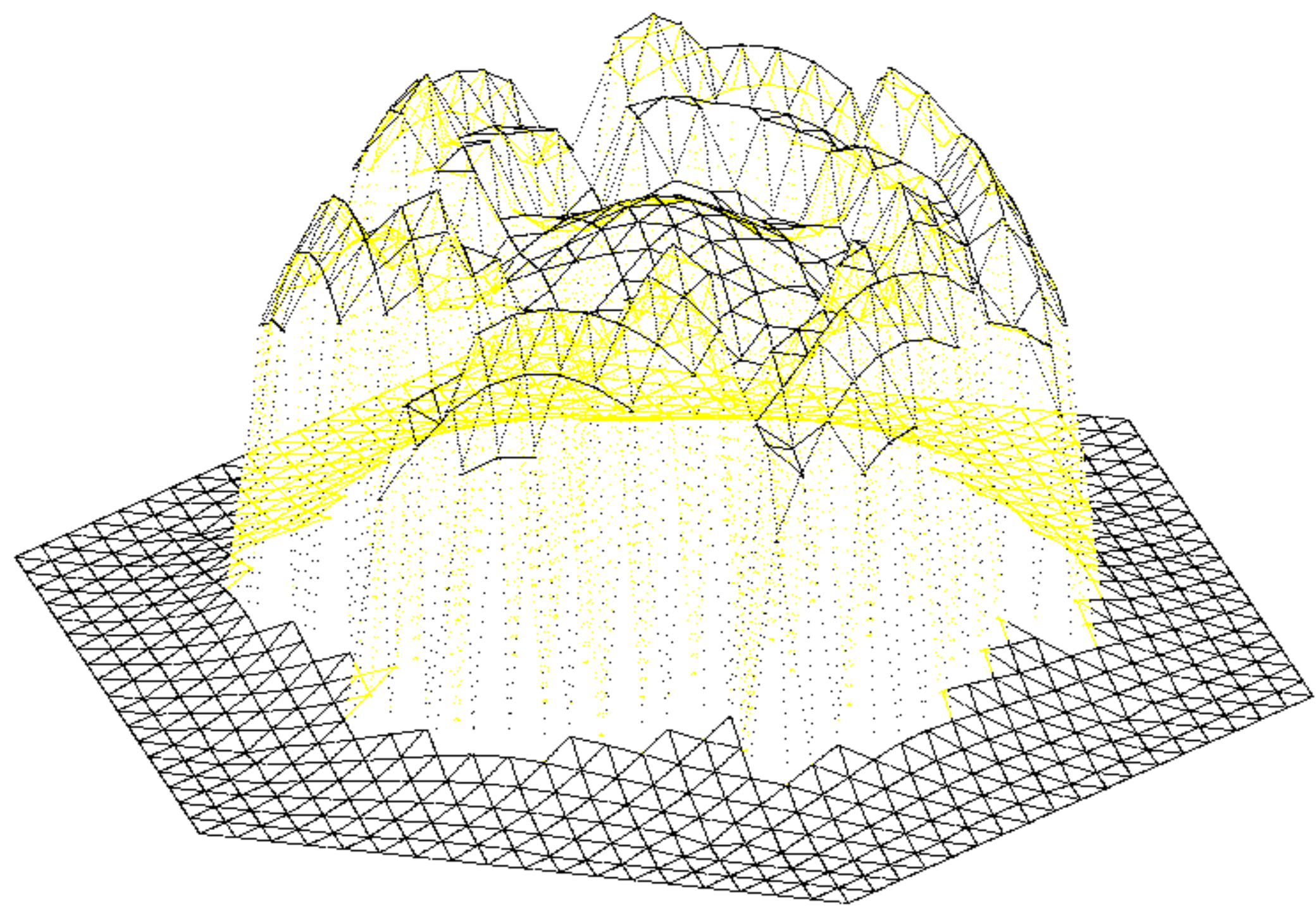
μ – концентрация источников остаточных энерговыделений;

\mathcal{G}

– постоянная распада.

$$\mu = \frac{\frac{4\mu_{t-1} - \mu_{t-2}}{2\Delta t} + \delta \sum_{m=1}^N \sum_{f_m} \bar{\Phi}_m}{\frac{3}{2\Delta t} + \mathcal{G}}$$

*Пример расчета активной
зоны РУ БН-600 по
ПС «Десна-9»*



*Область применения и
перспективы развития
программы «Десна-9»*

Область применения и перспективы развития

- ✓ Программа «Десна-9» является следующей ступенью развития нейтронно-физического модуля программного комплекса «Rainbow-TRP»
- ✓ Трехмерный нейтронно-физический расчет РУ типа БН в составе комплекса программ «РАДУГА-ЭУ»
- ✓ Многогрупповой потвальный расчет в составе п/к «РАДУГА-ЭУ» отдельных ТВС (до семи для ВВЭР-1000)
- ✓ Моделирование процессов в активных зонах исследовательских реакторов
- ✓ В перспективе, с развитием вычислительной техники, потвальный расчет всей активной зоны