

Тема 4: ИЗМЕНЕНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ ПРИ РАБОТЕ РЕАКТОРА

**ПОНЯТИЯ ОБЩЕГО И
ОПЕРАТИВНОГО ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ
РЕАКТОРА**

**Общий запас
реактивности реактора**

**Оперативный запас
реактивности**

$$\rho_3^{\text{общ}}(t) = \rho_3^{\text{он}}(t) + \rho_3^{\text{ен}}(t) + \rho_3^{\text{жс}}(t)$$

**Хорошо или плохо иметь
большую величину
оперативного запаса
реактивности?**

1. Выгорание ядерного топлива

2. Шлакование ядерного топлива

3. Воспроизводство ядерного топлива

4. Выгорание выгорающих поглотителей

5. Отравление реактора

6. Изменение концентрации борной кислоты в воде 1 контура

7. Температурные изменения реактивности

**УМЕНЬШЕНИЕ ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ С
ВЫГОРАНИЕМ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

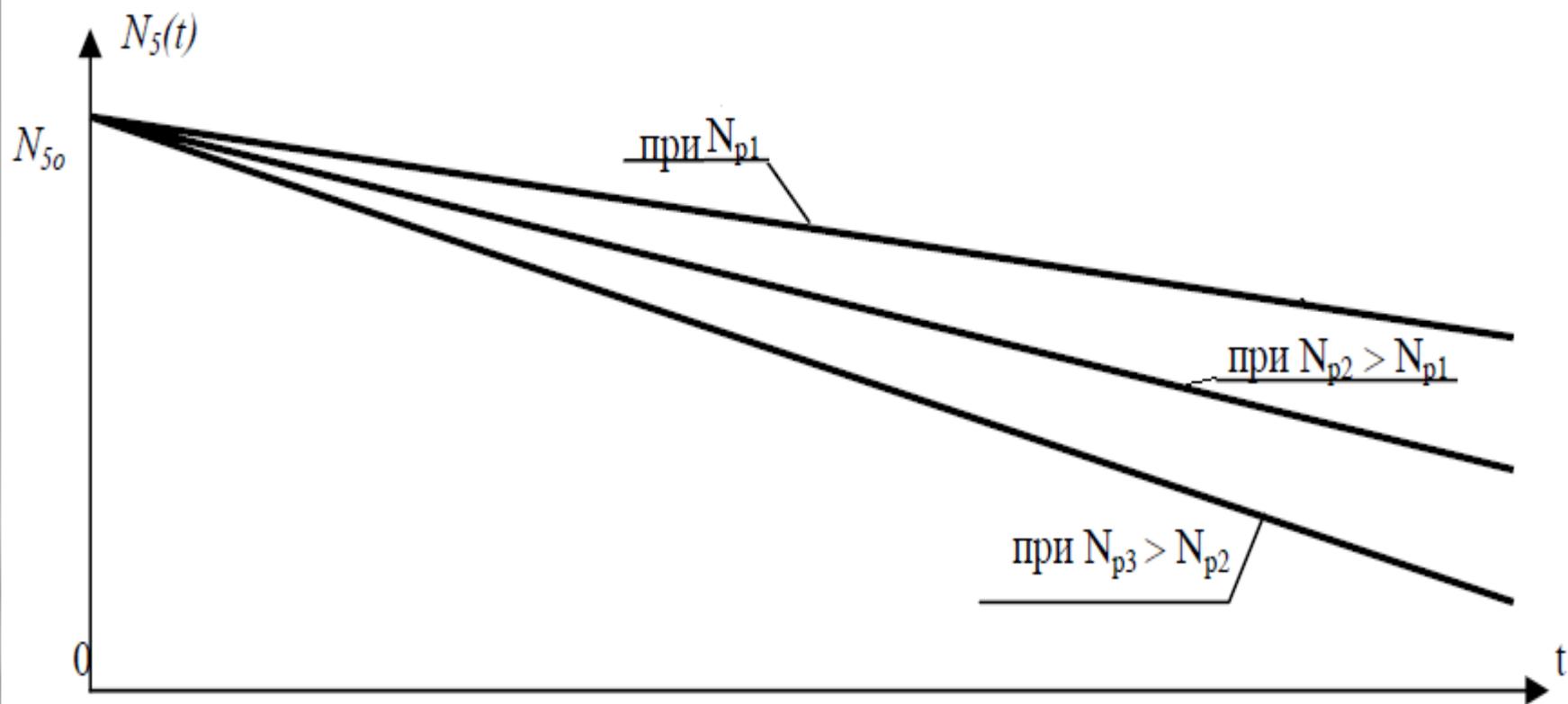
Выгорание -

Дифференциальное уравнение выгорания урана-235

$$\frac{dN_5}{dt} = -\sigma_a^5 \cdot N_5(t) \cdot \Phi(t)$$

при начальном условии: $t = 0$ $N_5(0) = N_{50}$ (N_{50} - начальная концентрация ядер ^{235}U в первый момент кампании)

$$N_5(t) = N_{50} - \frac{\sigma_a^5}{C_N} N_p t = N_{50} - \sigma_a^5 N_{50} \Phi_o t = N_{50} (1 - \sigma_a^5 \Phi_o t)$$



Линейный характер уменьшения количества топлива с его выгоранием при работе реактора на разных уровнях мощности реактора

Энерговыработка реактора (W)

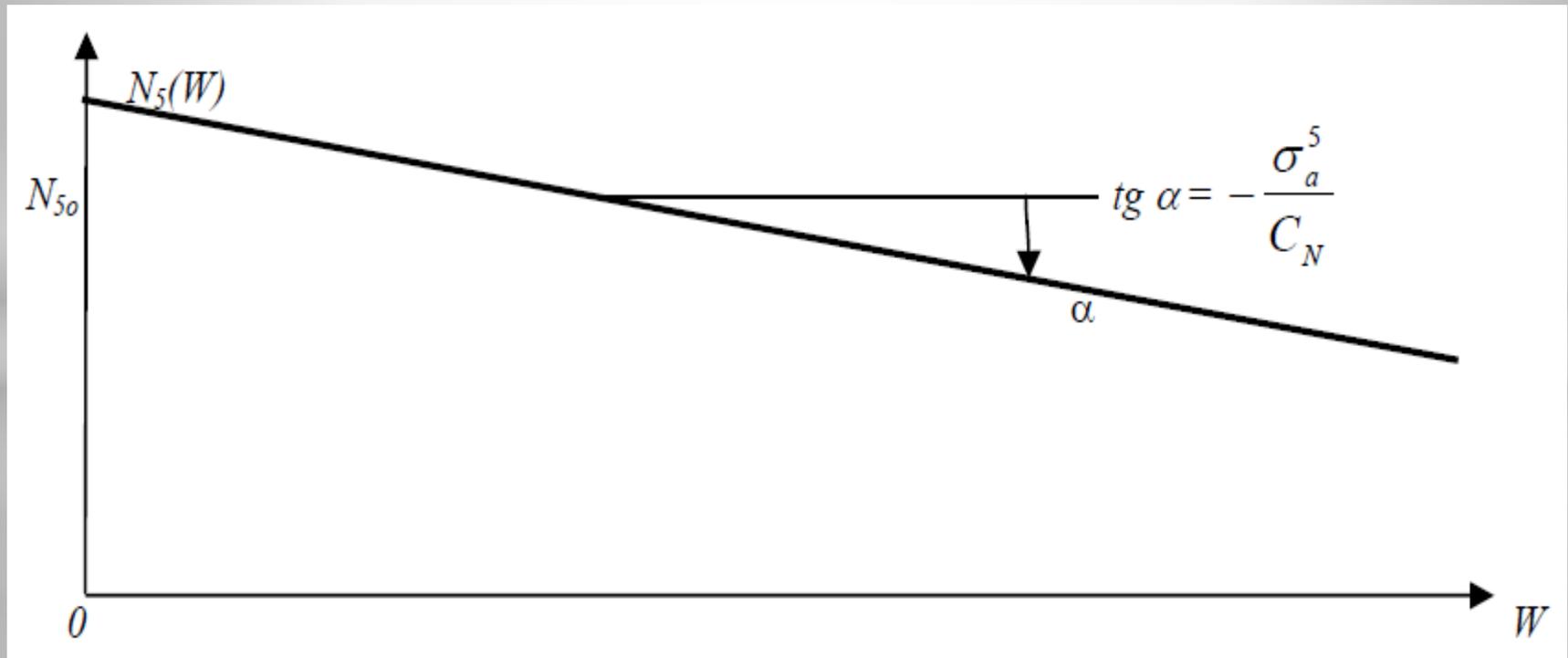
$$W = N_p t$$

$$\Delta W = N_{p1} \cdot t_1 + N_{p2} \cdot t_2 + N_{p3} \cdot t_3 + \dots + N_{pn} \cdot t_n = \sum_{i=1}^n N_{pi} \cdot t_i$$

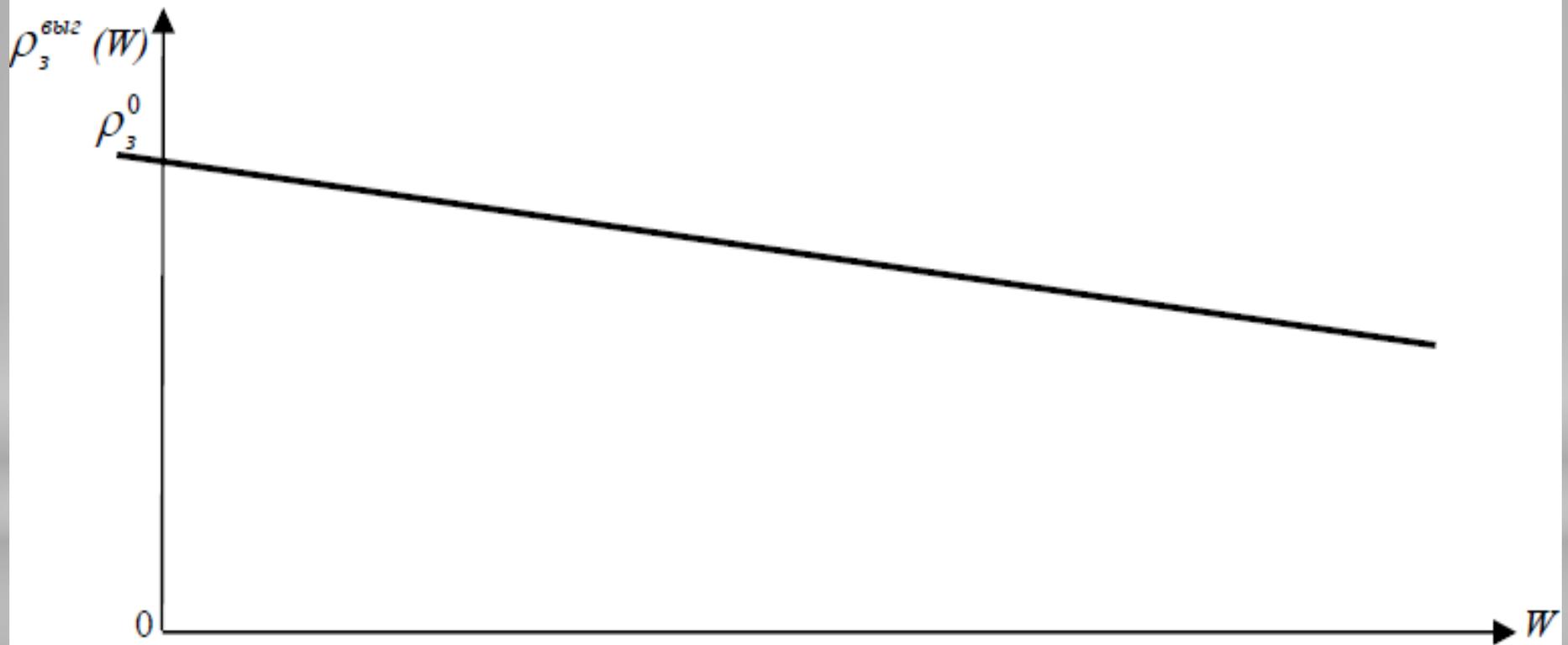
$$W(t_2) = W(t_1) + \Delta W(t_1 \rightarrow t_2)$$

**Потери запаса
реактивности с
выгоранием топлива**

$$N_5(t) = N_{50} - \frac{\sigma_a^5}{C_N} W(t)$$



Линейный характер уменьшения концентрации ^{235}U с энерговыработкой реактора



Характер убывания запаса реактивности в процессе кампании реактора за счёт выгорания основного топлива (^{235}U)

Основные характеристики выгорания

Степень выгорания топлива

$$z(t) = \frac{N_{50} - N_5(t)}{N_{50}} = 1 - \frac{N_5(t)}{N_{50}} = \sigma_a^5 \Phi_o t$$

$$z(t) = \frac{\sigma_a^5}{C_N \cdot N_{50}} \cdot W(t)$$

Глубина выгорания

$$b(t) = \frac{W(t)}{M_{U_0}}$$

МВт сутки/т или ГВт сутки/т

**УМЕНЬШЕНИЕ ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ ЗА СЧЁТ
ШЛАКОВАНИЯ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Количественные меры шлакования

- удельный выход (γ^i)
- микросечения поглощения (σ^{ai})
- макросечения поглощения нейтронов (Σ^{ai})
- относительная доля поглощаемых нейтронов q_{ui}

$$q_{ui}(t) = \frac{\sigma_a^i N_i \Phi}{\sigma_a^5 N_5 \Phi} = \frac{\sigma_a^i}{\Sigma_a^5} N_5(t)$$

$$\rho_{ui}(t) = - q_{ui}(t) \theta$$

Кинетика роста потерь запаса реактивности за счёт шлакования

$$\frac{dN_i}{dt} = \gamma_i \sigma_f^5 N_5(t) \Phi(t) - \sigma_a^i N_i(t) \Phi(t)$$

$$\rho_w(t) = -\theta \cdot \frac{\sigma_f^5}{\sigma_a^5} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{\gamma_i \sigma_a^i}{\sigma_a^i - \sigma_a^5} \cdot \left[1 - (1 - \sigma_a^5 \Phi_0 t)^{\frac{\sigma_a^i}{\sigma_f^5} - 1} \right]$$

$$\rho_w(z) = -0.852\theta \sum_{i=1}^k \frac{\gamma_i \sigma_a^i}{\sigma_a^i - \sigma_a^5} \left[1 - (1 - z)^{\frac{\sigma_a^i}{\sigma_a^5} - 1} \right]$$

Иоффе и Окуня (1945 г.) предложили поделить 60 шлаков на 3 группы с усредненными характеристиками

1. Удельный выход группы шлаков

$$\gamma_{гр} = \sum_{i=1}^m \gamma_i$$

2. Средняя величина микросечения поглощения группы

$$\sigma_a^{гр} = \frac{1}{\gamma_{гр}} \sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_a^i$$

ТРИ ГРУППЫ ШЛАКОВ

1. Первая группа (сильные шлаки)

$$(\sigma_a^i)_{1гр} \gg \sigma_a^5$$

$$\rho_{ш1гр} \approx - 0.0151 \theta$$

2. Вторая группа

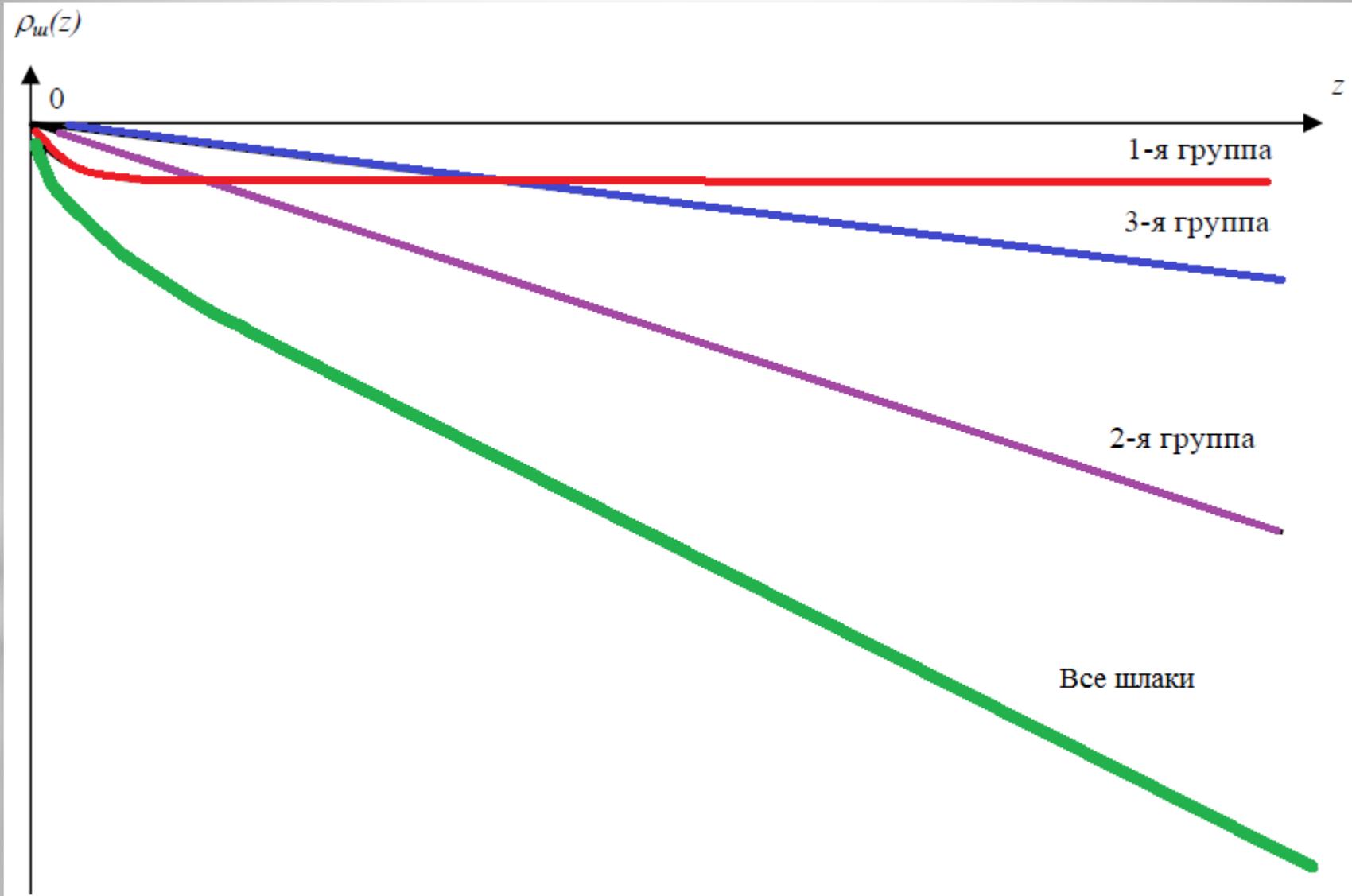
$$\sigma_a^i \sim \sigma_a^5$$

$$\rho_{ш2гр} \approx - 0.0414 z \theta$$

3. Третья группа (слабые шлаки)

$$\sigma_a^i \ll \sigma_a^5$$

$$\rho_{ш3гр} \approx - 0.0114 z \theta$$



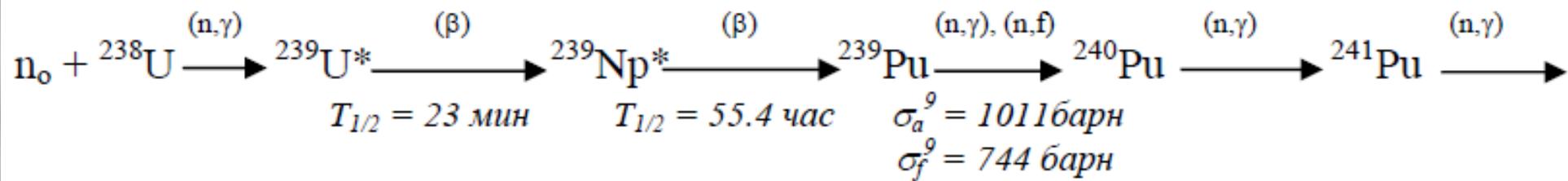
Качественный характер роста потерь запаса реактивности за счёт отдельного шлакования реактора шлаками трёх групп и кривая потерь запаса реактивности от шлакования всеми шлаками

ВЫВОД

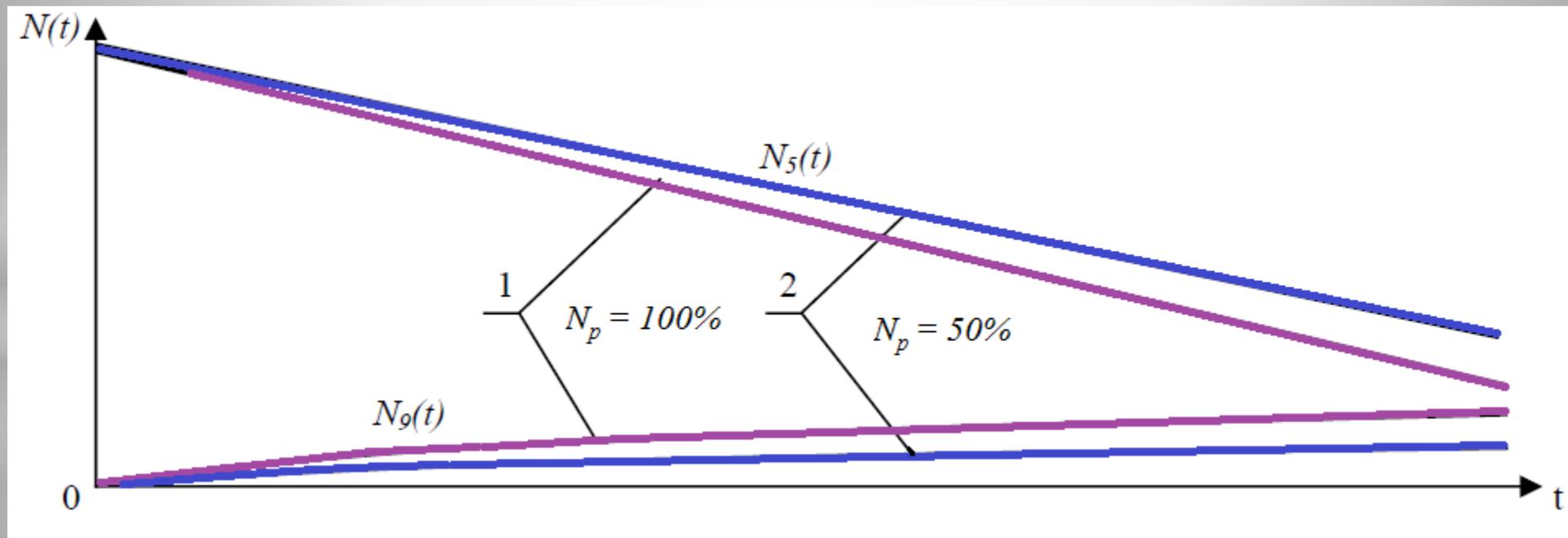
Потери запаса реактивности реактора от шлакования в процессе кампании в зависимости от энерговыработки (или степени выгорания урана-235) лишь в самый начальный период кампании (<5% от номинальной энерговыработки реактора) нарастают не линейно, что объясняется относительно быстрым ростом концентрации каждого из сильных шлаков до их стационарных концентраций. В оставшийся период кампании они растут практически по линейному закону от энерговыработки, степени выгорания, а при постоянном уровне мощности реактора - и во времени.

**РОСТ ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ С
ВОСПРОИЗВОДСТВОМ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Схема образования и убыли ВТОРИЧНОГО ТОПЛИВА



Рост запаса реактивности с воспроизводством Pu-239



Качественный вид изменений концентраций урана-235 и плутония-239 во времени при работе реактора на постоянных уровнях мощности

Коэффициент воспроизводства ядерного топлива

$$R = \frac{dN_9}{dt} : \frac{dN_5}{dt} = \frac{dN_9}{dN_5}$$

$$R = \frac{A_{\text{БЫГ}} m_{\text{БТ}}}{A_{\text{БТ}} m_{\text{БЫГ}}}$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Характеристики наиболее распространенных выгорающих поглотителей

- Борный ВП.
- Гадолиниевый ВП

Факторы, определяющие скорость выгорания ВП

Относительное поглощение тепловых нейтронов
выгорающим поглотителем

$$q_{en}(t) = \frac{dN_{en}}{dt} \cdot \frac{dN_5}{dt} = \frac{\sigma_a^{en}}{\sigma_a^5} \cdot \frac{N_{en}(t)}{N_5(t)} \cdot \frac{\Phi_{en}(t)}{\Phi_T(t)} \cdot \frac{V_{en}}{V_T}$$

Потери реактивности за счёт поглощения
тепловых нейтронов выгорающим поглотителем

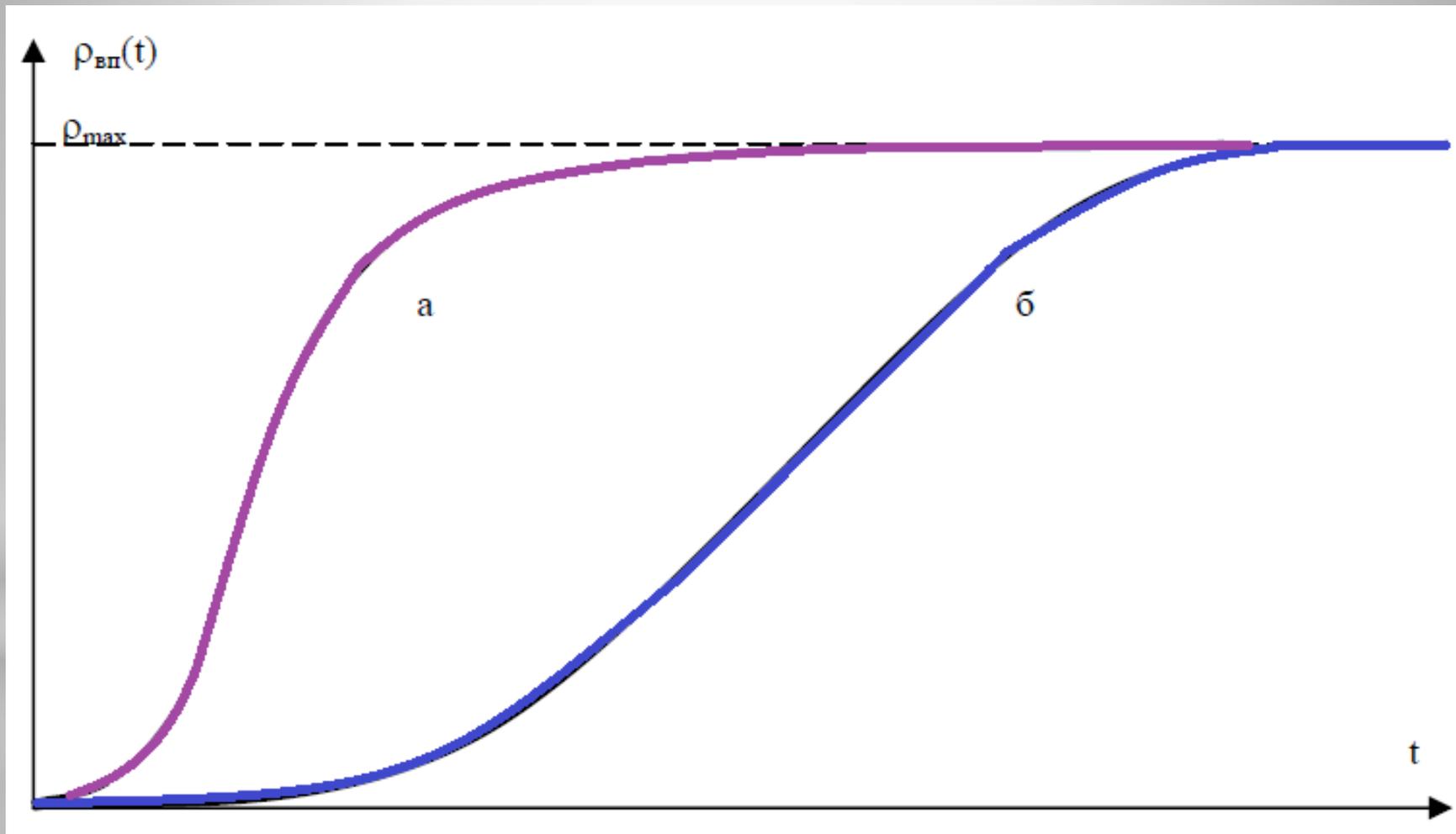
$$\rho_{en}(t) = -q_{en}(t) \cdot \theta = -\frac{\sigma_a^{en}}{\sigma_a^5} \cdot \frac{N_{en}(t)}{N_5(t)} \cdot \frac{\Phi_{en}(t)}{\Phi_T(t)} \cdot \frac{V_{en}}{V_T} \theta$$

Характер изменения реактивности при разных способах размещения ВП

1. Гомогенный способ
2. Гетерогенный способ

При использовании ВП в гетерогенном варианте характерны два полярных случая его применения:

- Случай неблокированного (или слабоэкранированного) ВП
- Случай блокированного применения ВП



Внутренний блок-эффекта в
неблокированном (а) и блокированном (б)
стержнях с ВП

Кривая энерговыработки активной зоны реактора

