

**Тема 3: ОСНОВЫ КИНЕТИКИ  
ПОДКРИТИЧЕСКОГО  
РЕАКТОРА  
ПРИ ЕГО ПУСКЕ**

**Пуск реактора - это операция приведения его из подкритического состояния в критическое путём осторожного подъёма органов компенсации реактивности в критическое положение или снижения концентрации борной кислоты в воде первого контура до критического значения.**

# Источники нейтронов в подкритическом реакторе

$$n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_i = 0.$$

Если в активную зону такого критического реактора подать извне хотя бы один нейтрон, то этот нейтрон будет воспроизводиться в любом поколении:

$$n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_i = 1.$$

Если в активной зоне реактора полностью отсутствуют источники нейтронов, то даже критический по своим внутренним свойствам реактор работать не станет.

По истечении достаточно  
длительного времени плотность  
нейтронов в реакторе должна  
асимптотически спадать до нуля,  
чего в действительности не  
происходит.

# Нейтроны космического излучения.

Благодаря их высокой проникающей способности, могут попадать в активную зону реактора и вызывать деления ядер топлива.

В самых благоприятных условиях в активную зону по оценкам могут проникать лишь несколько нейтронов в течение часа.

# Нейтроны спонтанного деления.

Спонтанное деление было открыто нашими соотечественниками К.Петржаком и Г.Флёровым в 1940 году.



Скорость спонтанного деления пропорциональна только общему наличному в данный момент времени количеству спонтанно делящихся ядер.

Для  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ :

$$\frac{dN_5}{dt} = -\lambda_{5cn} N_5(t) \quad \text{и} \quad \frac{dN_8}{dt} = -\lambda_{8cn} N_8(t) \quad (3.1)$$

Величина постоянной спонтанного деления  
для  $^{235}\text{U}$  ( $\lambda_{5cn} \approx 1.156 \cdot 10^{-25} \text{ с}^{-1}$ )  
для  $^{238}\text{U}$  ( $\lambda_{8cn} \approx 2.745 \cdot 10^{-24} \text{ с}^{-1}$ ),  
сечение “обычного” (принудительного)  
деления  $^{235}\text{U}$  во много раз больше, чем у  
 $^{238}\text{U}$ .

1кг природного урана - 23 спонтанных деления/час.

80т урана - 1070 спонтанных нейтронов/с.

Спонтанное деление - более мощный источник нейтронов в подкритическом реакторе, чем нейтроны космического излучения.

# Нейтроны, испускаемые в реакторе в реакциях $(\alpha, n)$ , $(\gamma, n)$ и $(n, 2n)$

В твэлах накапливаются значительные количества  $\alpha$ - и  $\gamma$ -активных осколков деления, вызывающие указанные выше типы ядерных реакций с некоторыми другими осколками деления и продуктами их радиоактивных трансформаций.

В активной зоне остановленного после работы подкритического реактора всегда есть рассредоточенные по объёму его ТВЭЛОВ источники нейтронов, причём значительно более мощные, чем спонтанное деление.

Этот источник отсутствует в реакторе в начале кампании, из-за чего для обеспечения безопасного пуска реактора при физическом пуске в свежезагруженную активную зону приходится опускать искусственные источники нейтронов.

В активной зоне подкритического реактора всегда есть естественные источники нейтронов, действующие независимо от размножающих свойств активной зоны.

Несмотря на то, что эти  
источники являются  
маломощными, они делают  
принципиально возможным  
пуск реактора без  
использования специальных  
искусственных источников  
нейтронов.



**Устанавливаемая в  
подкритическом  
реакторе плотность  
нейтронов**

Как только реактор получил отрицательную реактивность, плотность нейтронов в нём от поколения к поколению неуклонно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю.

При наличии независимого источника нейтронов ( $s$  *нейтр./см<sup>3</sup>с*), величина нейтронной плотности не должна снижаться до нуля.

Элементарное уравнение кинетики реактора имеет вид:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k_{\text{э}}}{l} n(t) + s \quad (3.2)$$

$s$  - скорость прибыли нейтронов от источника, (величина удельной мощности источника нейтронов)

$\delta k_n$  (степень подкритичности реактора) - положительная величина недостатка величины эффективного коэффициента до единицы в подкритическом реакторе:

$$\delta k_n = 1 - k_{\text{eff}} = - \delta k_{\text{eff}} \quad (3.3)$$

Тогда 3.2 :

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\delta k_n}{l} n(t) + s$$

(3.4)

Когда  $n(t) = idem = n_y$ , величина производной  $dn/dt = 0$

$$0 = -\frac{\delta k_n}{l} \cdot n_y + s$$

$$n_y = \frac{sl}{\delta k_n}$$

(3.5)

Полученная формула подтверждает:

1. Величина устанавливающейся плотности нейтронов в подкритическом реакторе тем больше, чем больше величина мощности независимого источника нейтронов.
2. Величина устанавливающейся плотности нейтронов в подкритическом реакторе будет тем большей, чем больше величина среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе ( $l$ ).
3. Величина устанавливающейся плотности нейтронов в подкритическом реакторе будет тем большей, чем *меньше* величина степени подкритичности реактора.

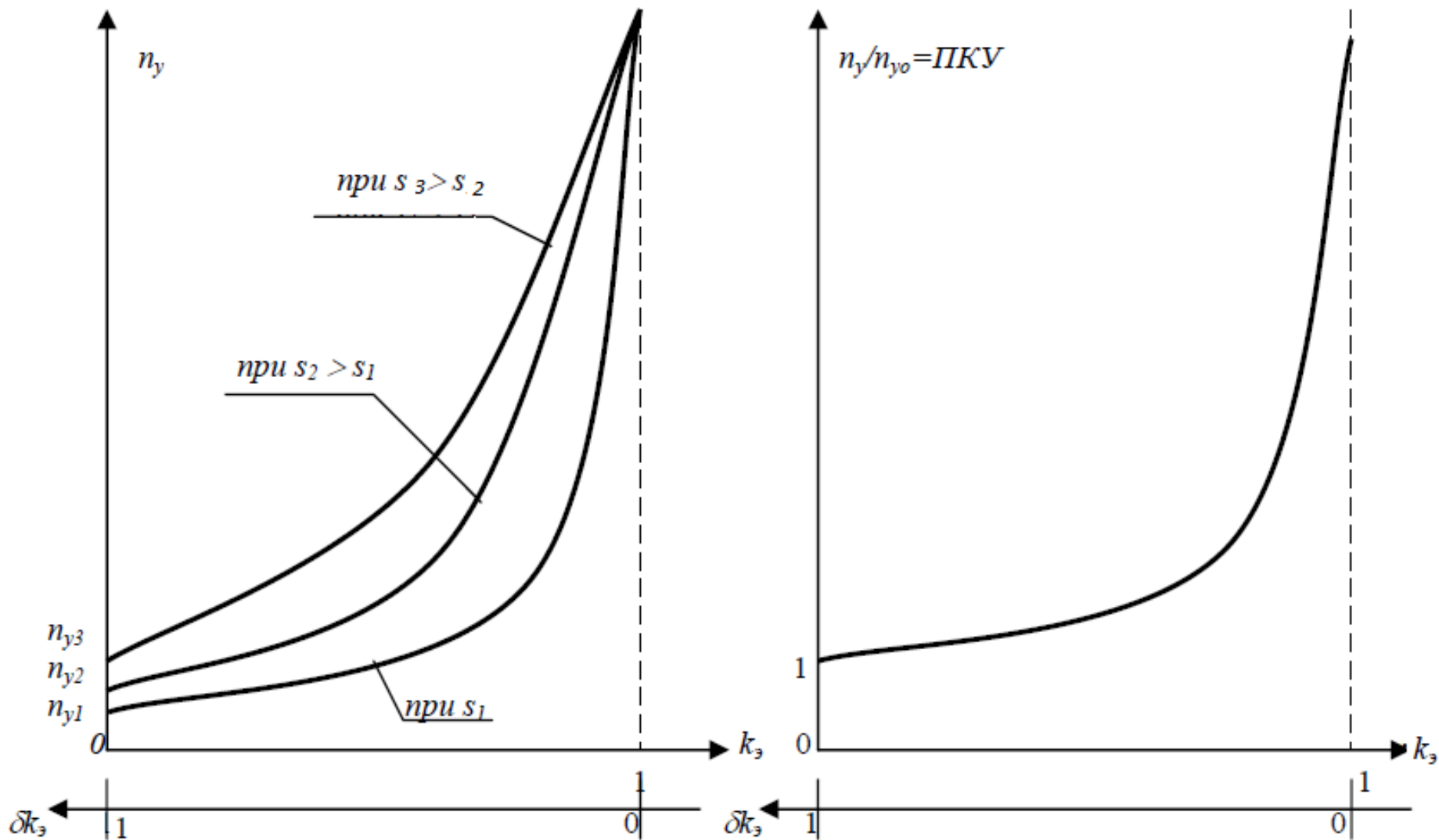


$sl$  [нейтр./см<sup>3</sup>] - устанавливаемая плотность нейтронов при  $\delta k_n = 1$ .

Начальная устанавливаемая  
плотность нейтронов в реакторе при  
данной мощности подкритического  
источника  $s$ , т.е.

$$n_{y0} = sl$$

(3.7)



Зависимость устанавливающейся подкритической плотности нейтронов от величины степени подкритичности реактора при трёх различных величинах мощности независимого источника нейтронов, и та же зависимость в безразмерном виде.

*Число, показывающее, во сколько раз величина устанавливающейся в реакторе плотности нейтронов при данной степени подкритичности больше величины начальной подкритической плотности нейтронов при рассматриваемой мощности источника нейтронов, называется подкритическим коэффициентом умножения (ПКУ):*

$$ПКУ = \frac{n_y(\delta k_n)}{n_{y0}} = \frac{1}{\delta k_n} \quad (3.7)$$

*- величина, обратная степени подкритичности реактора.*

Зависимости  
устанавливаемой плотности  
нейтронов в подкритическом  
реакторе при уменьшении  
степени подкритичности имеют  
возрастающий характер.

Опасность процедуры пуска

При приближении к критическому состоянию одинаковыми по величине ступенями изменения степени подкритичности, с каждой последующей ступенькой уменьшения  $\delta k_n$  разница устанавливающихся значений плотности нейтронов возрастает всё в большей и большей степени

Величина устанавливающейся подкритической плотности нейтронов при  $\delta k_n \rightarrow 0$  теоретически устремляется к бесконечности.

В реальном реакторе величина устанавливающейся плотности нейтронов при достижении реактором критического состояния становится величиной большой, но конечной.

При ограниченной  
чувствительности штатной  
пусковой аппаратуры СУЗ  
начальную стадию пуска  
приходится проводить  
вслепую

Штатные детекторы нейтронов  
должны быть рассчитаны на  
большие величины плотностей  
нейтронов и не должны в  
результате длительной работы  
в нейтронном потоке  
заметным образом изменять  
свои характеристики



В энергетических реакторах и используются в качестве штатных детекторов *ионизационные камеры*, являющиеся довольно грубыми приборами.

*Камеры деления* позволяют зафиксировать нейтронный поток в процессе пуска реактора значительно раньше, но они не годятся для длительной работы в предусмотренных режимах работы реактора

Так как покрытия их внутренних поверхностей тонким слоем высокообогащённого  $UO_2$  или  $PuO_2$  в больших потоках нейтронов довольно быстро выгорают, из-за чего камеры деления изменяют свои характеристики и поэтому дают искажённые показания величин плотности потока нейтронов

Частичная “слепота” пуска технически преодолима двумя путями:

- использованием при пуске нештатной высокочувствительной аппаратуры для регистрации нейтронов
- использованием в процессе пуска достаточно мощных независимых источников нейтронов

В транспортных реакторных установках пользуются вторым из упомянутых методов повышения безопасности пуска.

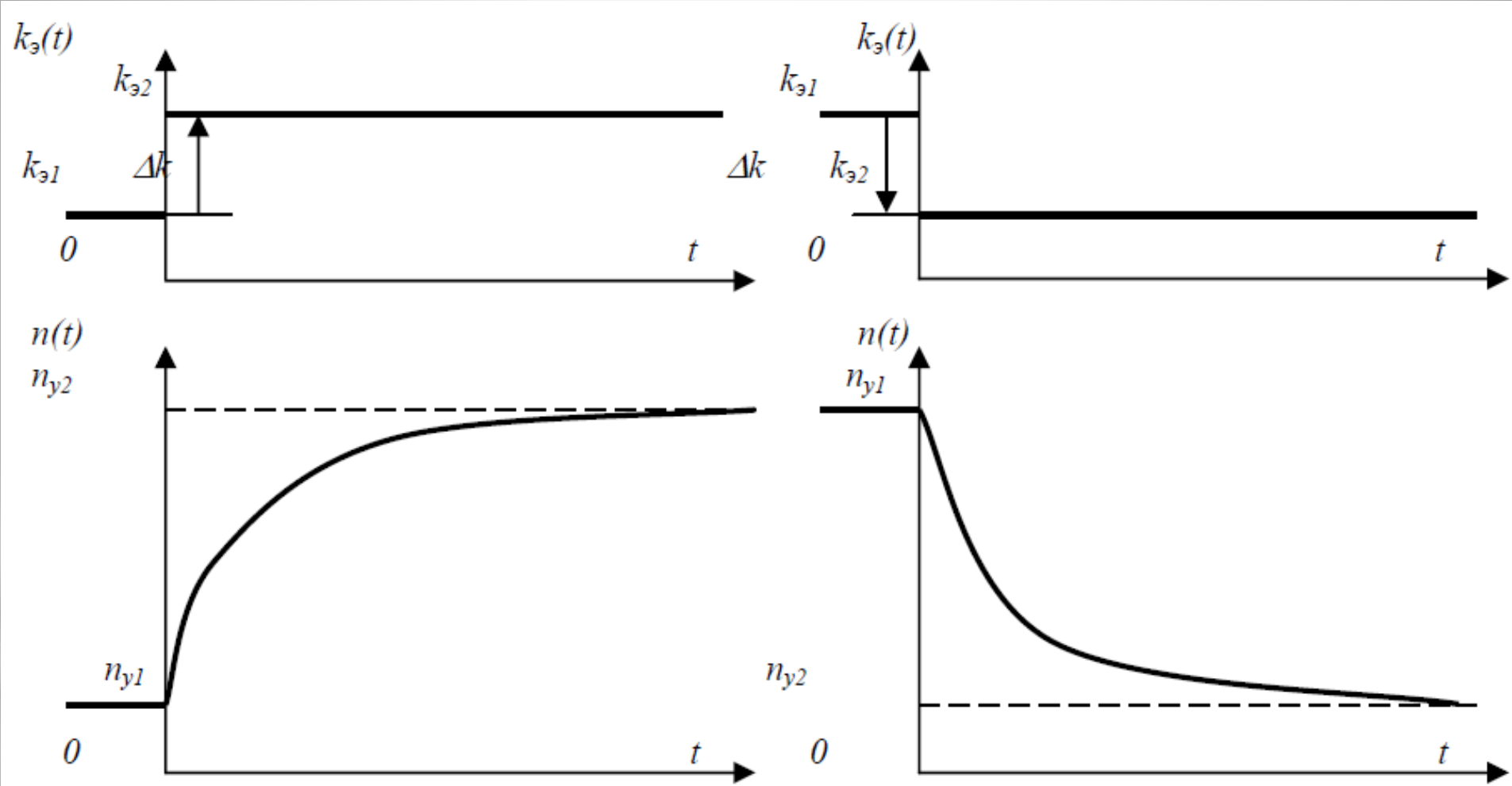
На энергоблоках АЭС используется первый метод.

# Переходные процессы при изменениях степени подкритичности реактора

Элементарное уравнение кинетики для переходного процесса

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\delta k_{n2}}{l} \left[ n(t) - \frac{sl}{\delta k_{n2}} \right]$$

$$\frac{n(t)}{n_{y1}} = \frac{1 - k_{s1}}{1 - k_{s1} - \Delta k} \left[ 1 + \frac{\Delta k}{1 - k_{s1}} \exp\left( \frac{k_{s1} + \Delta k - 1}{l} t \right) \right]$$



Экспоненциальный характер переходных процессов  $n(t)$  в подкритическом реакторе: а) при скачкообразном уменьшении степени подкритичности реактора (увеличении эффективного коэффициента размножения) и б) при увеличении степени подкритичности реактора (уменьшении  $k_3$ ).



**Время практического  
установления  
подкритической плотности  
нейтронов в реакторе  
после изменения степени  
подкритичности**

Период экспоненциального процесса - величина, обратная тому, что стоит в показателе перед переменной  $t$

$$T = \frac{l}{\delta k_{n2}}$$

Величина практического времени установления подкритической плотности нейтронов в реакторе

$$t_y \approx \frac{(4 \div 5)l}{\delta k_{n2}}$$

*Чем ближе реактор к критическому состоянию после очередной ступени подъёма органов компенсации реактивности, тем больше величина практического времени установления подкритической плотности нейтронов в реакторе.*

# ВЫВОДЫ

1. В подкритическом реакторе плотность нейтронов со временем не падает до нуля, а благодаря наличию в активной зоне естественных или искусственных источников нейтронов, независимых от реакции деления, стабилизируется определённом уровне.

2. Величина устанавливающейся плотности нейтронов в подкритическом реакторе определяется величинами:

а) удельной мощности источников нейтронов в реакторе  $s$ ;

б) среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе  $l$ ;

в) степенью подкритичности реактора  $\delta k_{n'}$

3. Переходные процессы  $n(t)$  в подкритическом реакторе представляют собой *экспоненциальные* переходы от одного (начального) установившегося значения  $n_{y1}$ , соответствующего начальной степени подкритичности  $\delta k_{n1}$ , до другого (конечного) значения  $n_{y2}$ , соответствующего конечной степени подкритичности  $\delta k_{n2}$ .

4. По мере приближения реактора к критическому состоянию из подкритического величины устанавливающейся плотности нейтронов в реакторе нарастают всё более и более резко. Это требует от оператора РУ предельной осторожности в процессе уменьшения степени подкритичности при пуске реактора.

5. Время практического установления подкритической плотности нейтронов определяется конечным значением степени подкритичности реактора. По мере приближения к критичности при пуске реактора время стабилизации плотности нейтронов *растёт*. Необходимы временные паузы между шагами уменьшения степени подкритичности с тем, чтобы перед каждым шагом уменьшения подкритичности значение плотности нейтронов обязательно *стабилизировалось*.