

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Тема 6. **РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ
ПОДОГРЕВ
ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ**

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ:

- теоретический цикл с регенерацией теплоты
- реализация регенеративного подогрева в ПТУ
- влияние РППВ на экономичность ПТУ
- распределение регенеративных отборов в турбине
- пароохладители и охладители дренажа



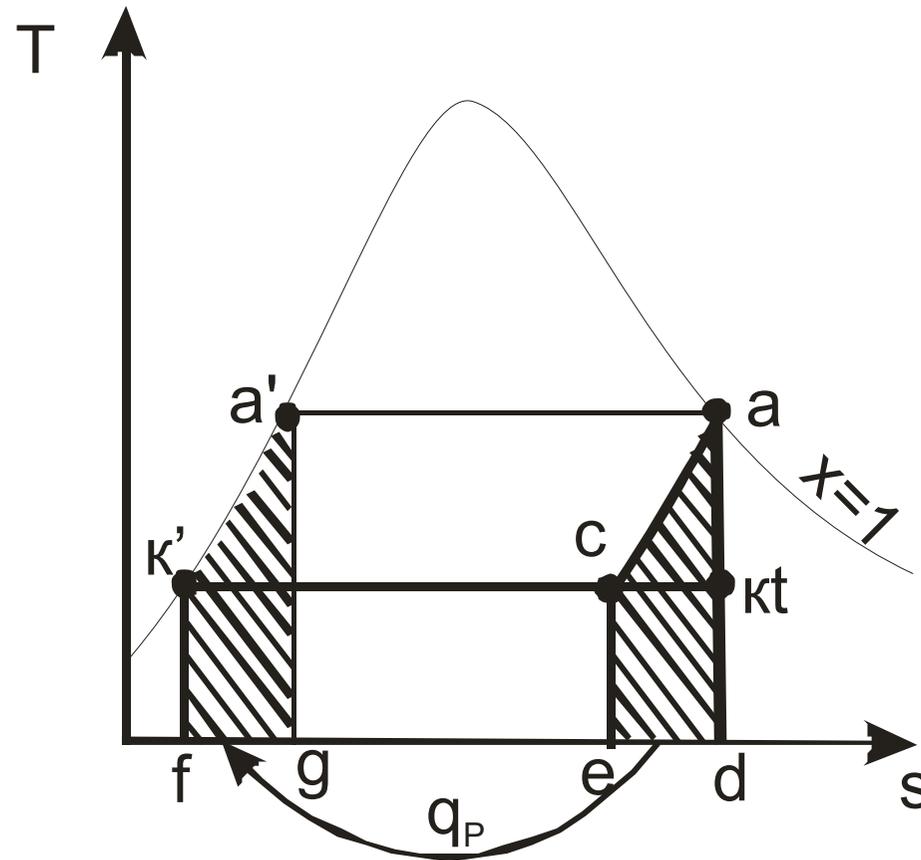
Для повышения экономичности цикла ПТУ необходимо увеличивать **среднюю температуру подвода теплоты** в цикле

Один из способов - применить принцип **регенерации теплоты**

Регенерация в тепловых циклах

использование теплоты рабочего тела, совершившего механическую работу, на другом участке цикла

Наиболее подходящий - участок нагрева
питательной воды

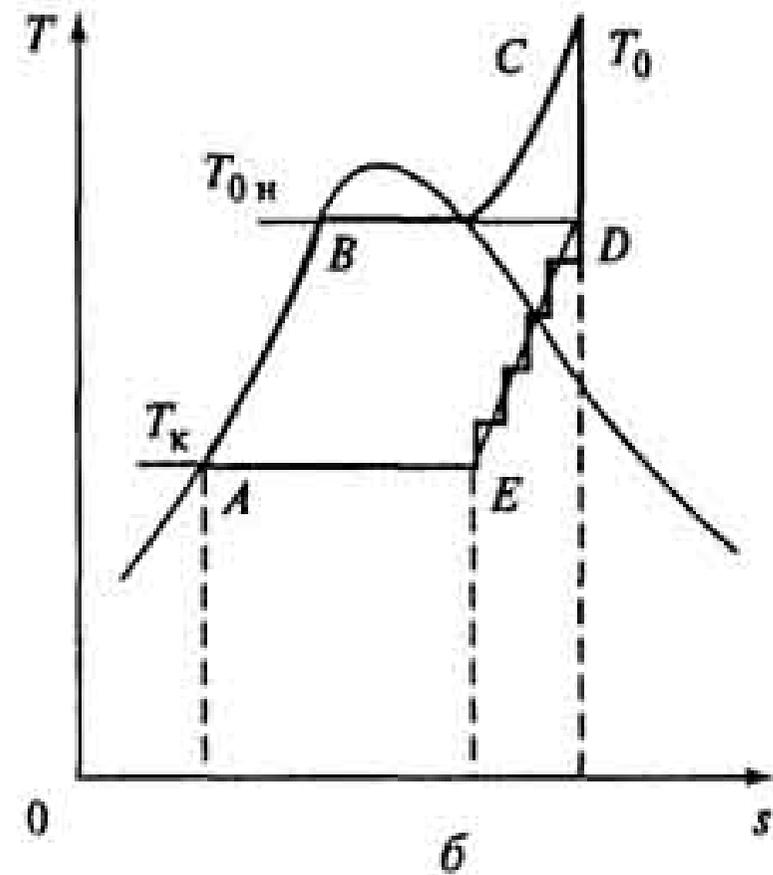
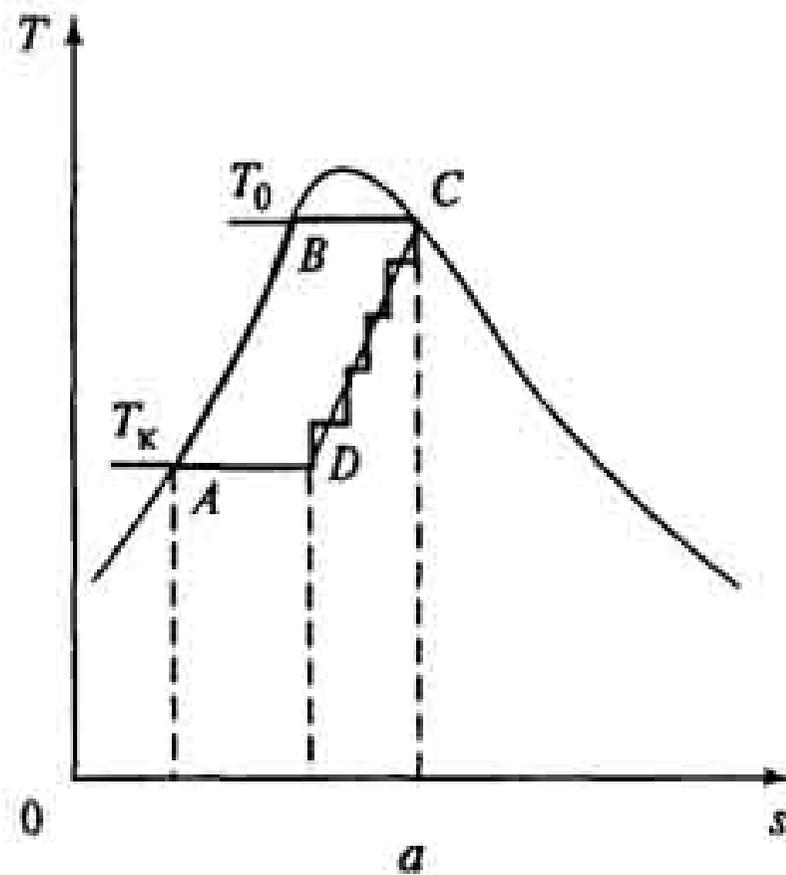


Регенерация теплоты

Выгода от применения регенерации:

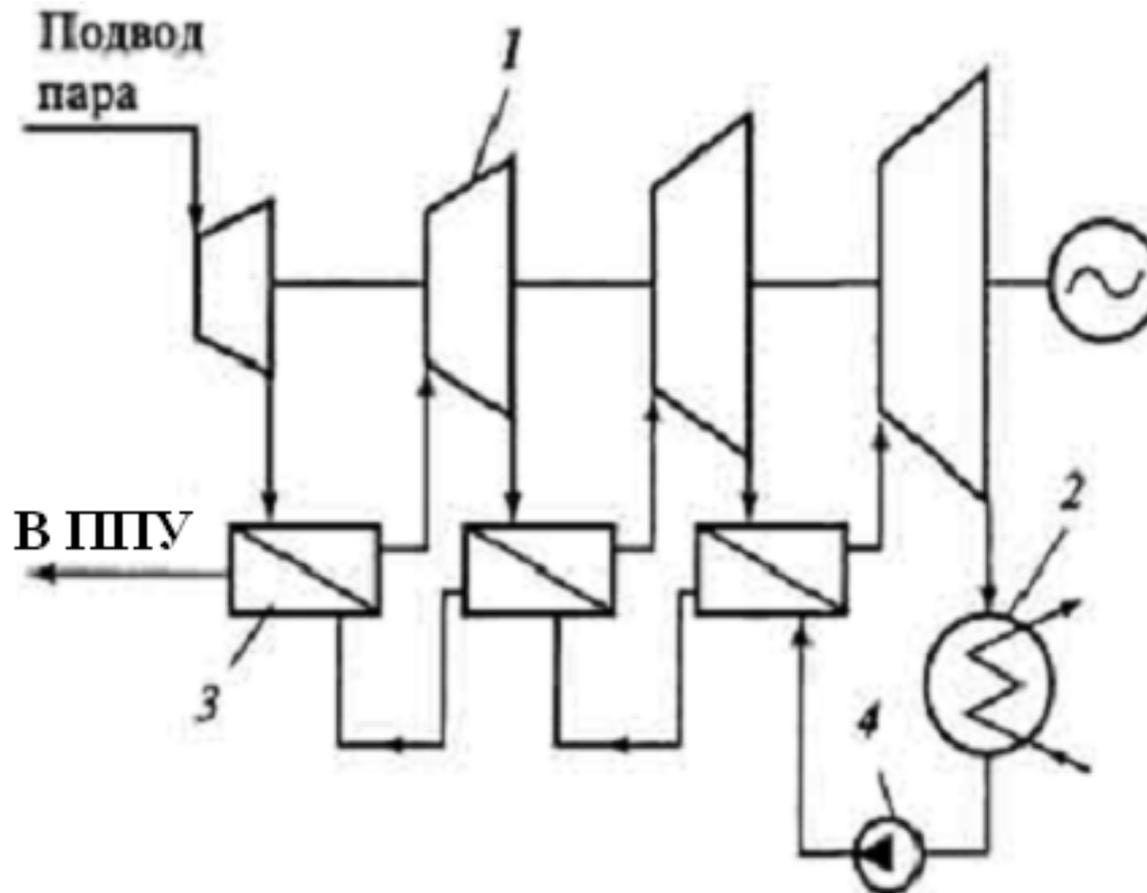
- снижение термодинамической необратимости процесса подвода теплоты на участке $k'-a'$
- снижение потерь теплоты в холодном источнике

Теоретический регенеративный цикл

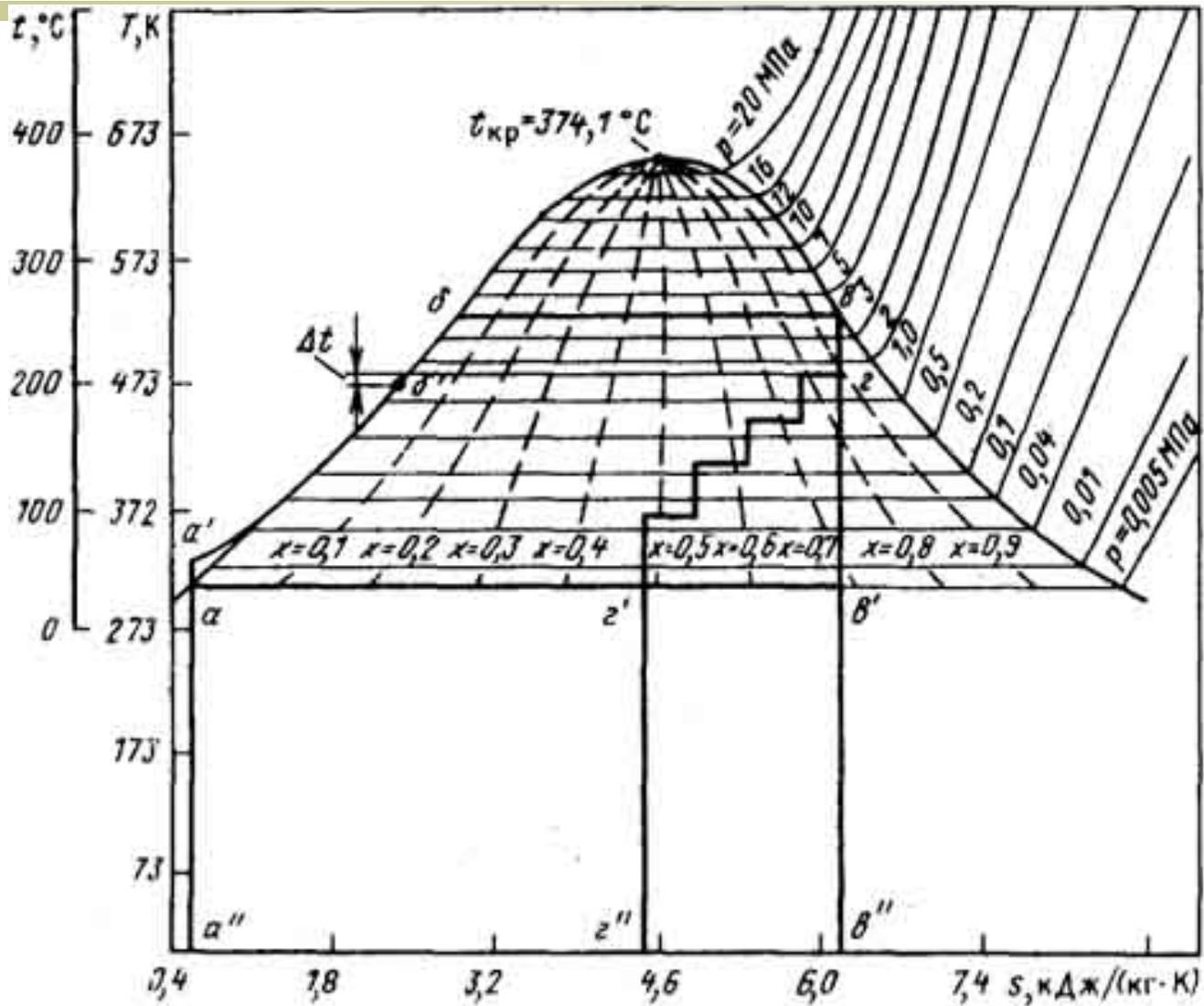


Регенерация теплоты

Схема теоретического регенеративного цикла



Теоретический регенеративный цикл в Ts-диаграмме



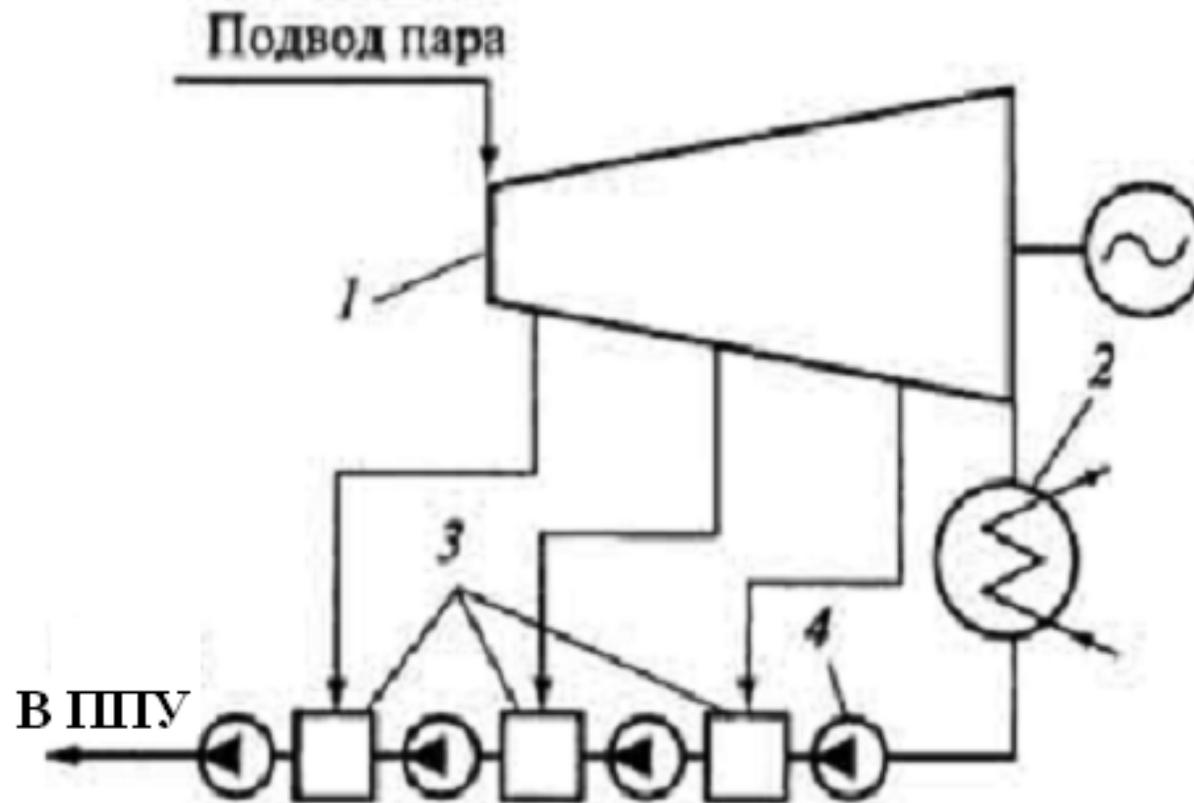
Теоретический предельный регенеративный цикл

- бесконечно большое число ступеней регенерации
- бесконечно малые теплоперепады каждой ступени

Неосуществимость теоретического регенеративного цикла:

- недопустимая влажность пара в конце расширения
- большие размеры
 - подогревателей
 - сечений отборов
 - трубопроводов
- потери давления чрезмерно велики

Схема регенеративного подогрева питательной воды (РППВ)



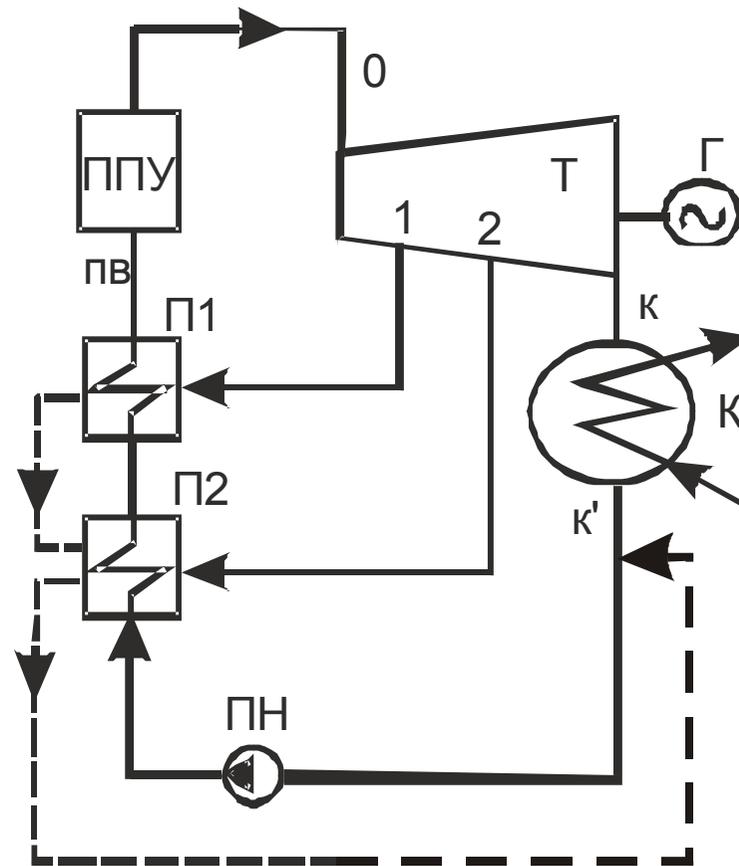


Степень РППВ :

- отбор пара
- подогреватель
- паропровод

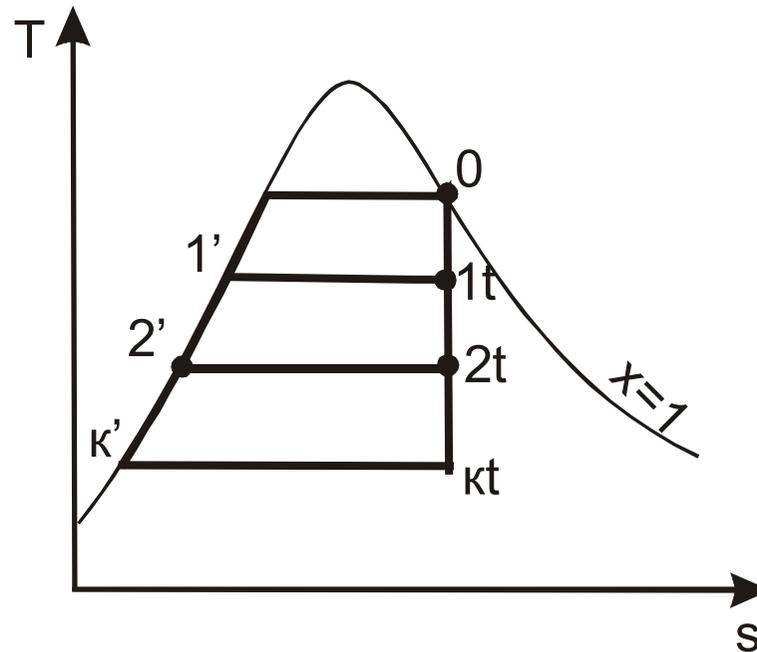
Преимущества этой схемы

Паротурбинная установка с двумя ступенями РППВ



Регенерация теплоты

Цикл ПТУ с РППВ в T_s -диаграмме



Работа 1 кг пара в идеальном цикле с РПШВ

по отсекам турбины:

$$\begin{aligned}l_p &= l_I + l_{II} + l_K = h_0 - h_{1t} + (1 - \alpha_1) \cdot (h_{1t} - h_{2t}) + \\ &\quad (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_{2t} - h_{kt}) = \\ &= \mathbf{h_0 - \alpha_I h_{1t} - \alpha_2 h_{2t} - \alpha_K h_{kt}}.\end{aligned}$$

В реальном цикле с РПШВ

работа турбины

$$\begin{aligned} l_i^p = H_i^p &= h_0 - h_1 + (1 - \alpha_1) \cdot (h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1 - \\ &\quad \alpha_2) \cdot (h_2 - h_k) = \\ &= h_0 - \alpha_1 h_1 - \alpha_2 h_2 - \alpha_k h_k \end{aligned}$$

**Приведенный теплоперепад турбины при
 n числе подогревателей**

$$l_i^p = H_i^p = h_0 - \sum_{j=1}^n \alpha_j h_j - \alpha_K h_K$$

ИЛИ

$$H_i^p = h_0 - h_K - \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_j - h_K)$$

[

]

Заменяя

$$\alpha_K = 1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j$$

получим:

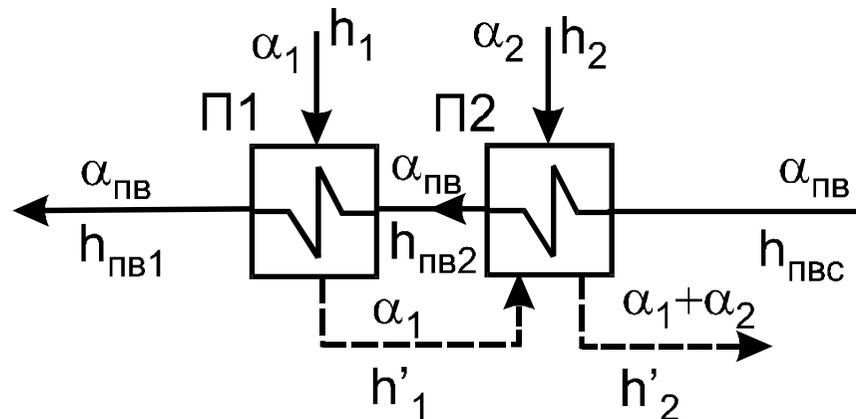
Коэффициент недовыработки мощности j - го отбора пара

$$y_j = \frac{h_j - h_{\text{К}}}{H_i} = \frac{h_j - h_{\text{К}}}{h_0 - h_{\text{К}}}$$

Приведенный теплоперепад для турбины с n отборами

$$H_i^p = h_0 - h_K - \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_j - h_K) = H_i (1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot y_j)$$

Тепловые балансы подогревателей



$$\alpha_1 (h_1 - h'_1) \cdot \eta_{\Pi} = \alpha_{\text{ПВ}} (h_{\text{ПВ1}} - h_{\text{ПВ2}})$$

$$[\alpha_2 (h_2 - h'_2) + \alpha_1 (h'_1 - h'_2)] \cdot \eta_{\Pi} = \alpha_{\text{ПВ}} (h_{\text{ПВ2}} - h_{\text{ПВ3}})$$

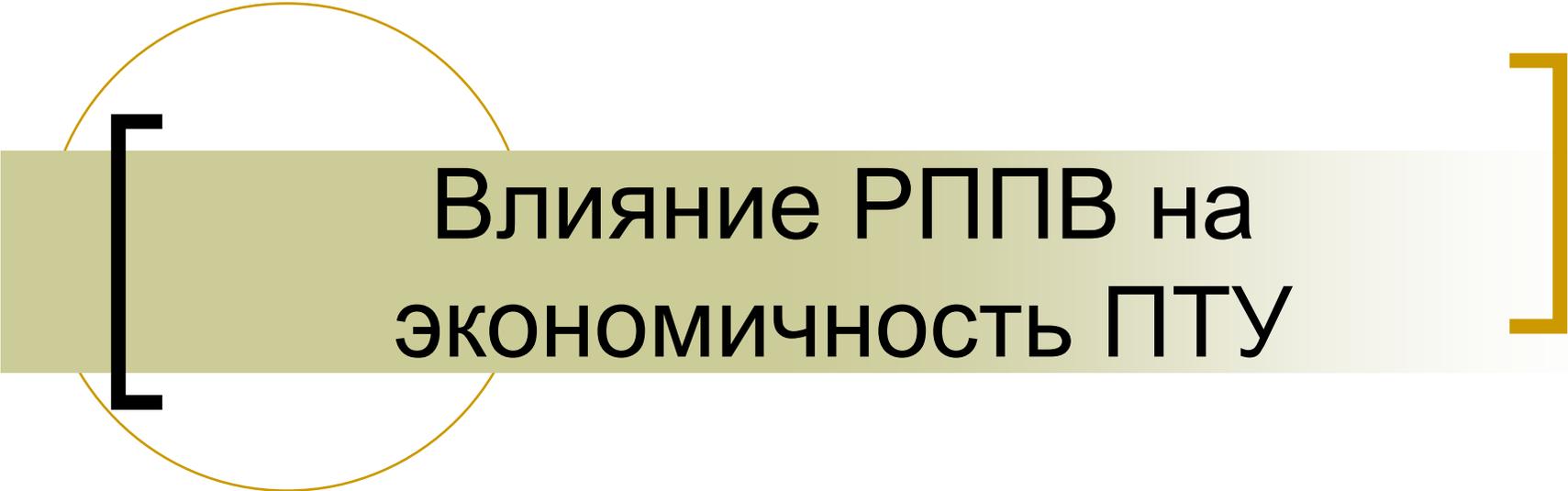
Тепловая экономичность ПТУ с РППВ

Термический КПД цикла с регенерацией

$$\eta_t^p = \frac{H_0^p}{q_1^p} = \frac{H_0^p}{h_0 - h_{\text{ПВ}}} = \frac{\alpha_K (h_0 - h_{\text{кт}}) + \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_0 - h_{jt})}{(\alpha_K + \sum_{j=1}^n \alpha_j)(h_0 - h_{\text{ПВ}})}$$

Абсолютный внутренний КПД ПТУ с РППВ

$$\eta_i^p = \frac{H_i^p}{q_1^p} = \frac{H_i^p}{h_0 - h_{\text{ПВ}}} = \frac{\alpha_K (h_0 - h_K) + \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_0 - h_j)}{h_0 - h_{\text{ПВ}}}$$



Влияние РППВ на экономичность ПТУ

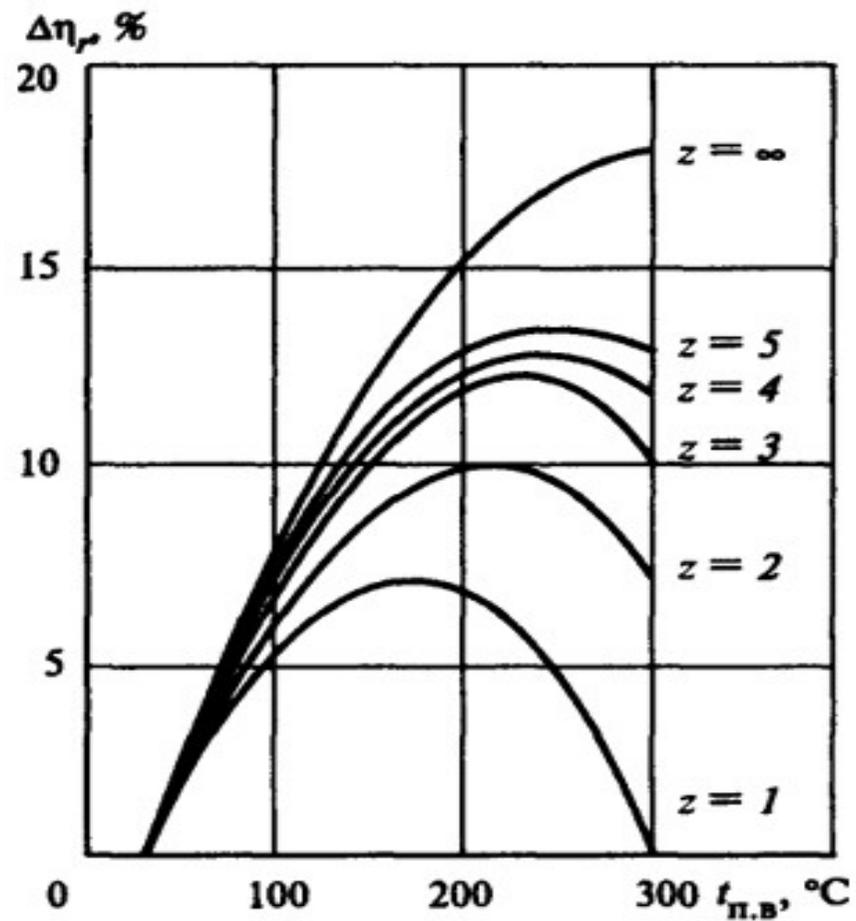
Энергетический коэффициент регенерации

$$A^p = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j (h_0 - h_j)}{\alpha_K (h_0 - h_K)}$$

**КПД ПТУ с РППВ всегда выше, чем КПД
исходного цикла Ренкина**

$$\eta_i^{\text{рег}} = \eta_i^{\text{р}} \frac{1 + A^{\text{р}}}{1 + A^{\text{р}} \cdot \eta_i^{\text{р}}}$$

Зависимость относительного повышения КПД установки от $t_{п.в}$ и числа z



Выводы:

- Чем больше z , тем выше КПД цикла
- Максимум КПД достигается при оптимальном значении $t_{пв}$
- С увеличением z оптимальная $t_{пв}$ увеличивается
- С увеличением z **прирост** термического КПД замедляется

На практике в энергетических ПТУ

- 7–8 ступеней РППВ
- повышение термического КПД ПТУ на **15–17 %** (относительных)

Мощность турбины в ПТУ с РППВ

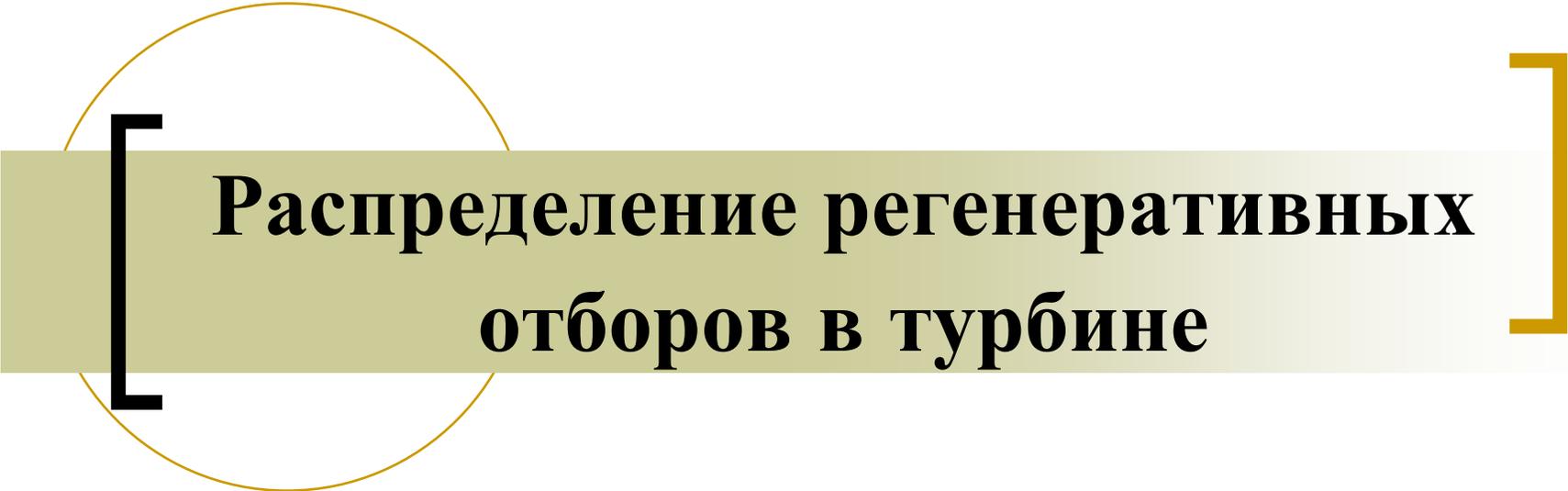
$$N_i = G \cdot H_i^p = G \cdot H_i \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot y_j\right)$$

Расход пара на турбину в ПТУ с РППВ

$$G = \frac{N_i}{H_i \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot y_j\right)}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Всегда G_0 в установке с РППВ больше, чем в ПТУ, работающей по циклу Ренкина

$$k_p = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot y_j} > 1$$



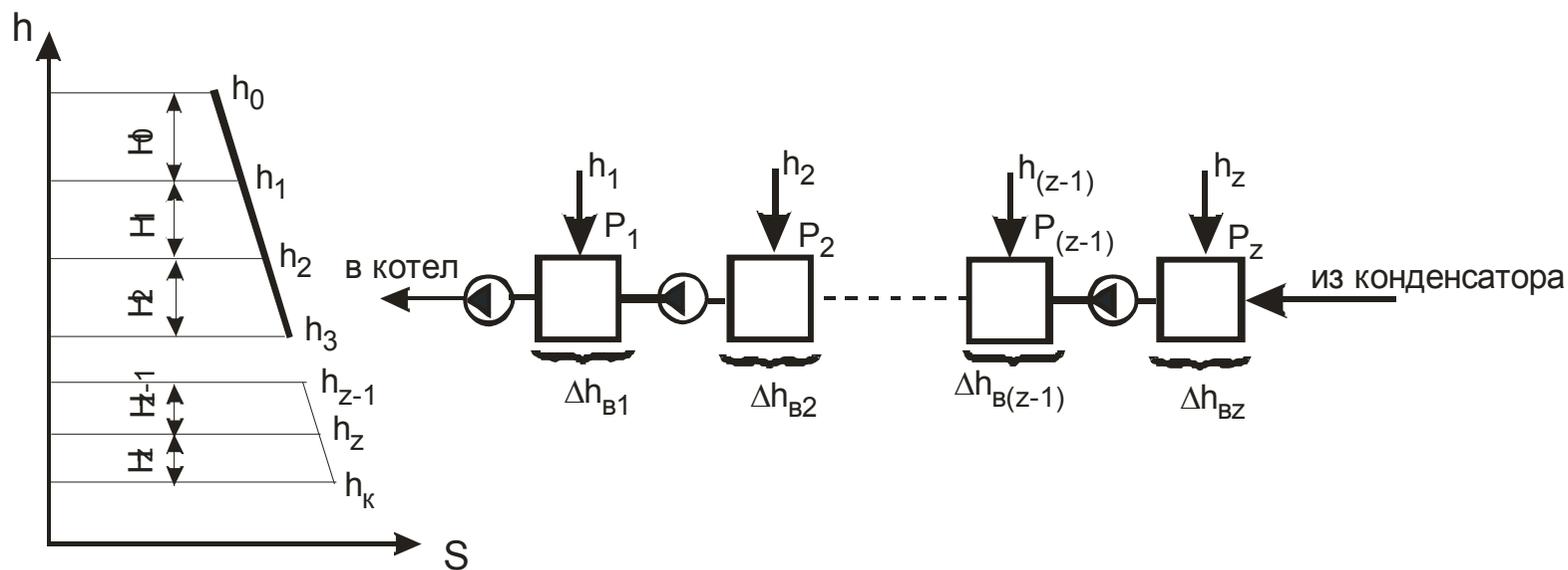
**Распределение регенеративных
отборов в турбине**

Выбор количества отборов и давлений в них

Критерий - максимум абсолютного внутреннего КПД турбоустановки

**В условиях максимальной тепловой
экономичности**

Оптимальное распределение РППВ на реальных АЭС



$$\Delta h_{B1} = H_0; \quad \Delta h_{B2} = H_1; \quad \dots \quad \Delta h_{Bz} = H_{z-1}$$

Равномерное распределение нагрева

$$\Delta h_{Вп} = \frac{(h'_0 - h'_K)}{z + 1}$$

Допущение:

количество теплоты, отдаваемой 1 кг пара от подогревателя к подогревателю, остается неизменным

Метод *постоянного прироста энтропии воды*

$$\Delta S = \frac{(s'_0 - s'_K)}{z + 1}$$

$$\Delta S = \frac{(s'_{\text{ПВ}} - s'_K)}{z}$$

***Распределение подогрева при
изотермическом отводе теплоты от
пара***

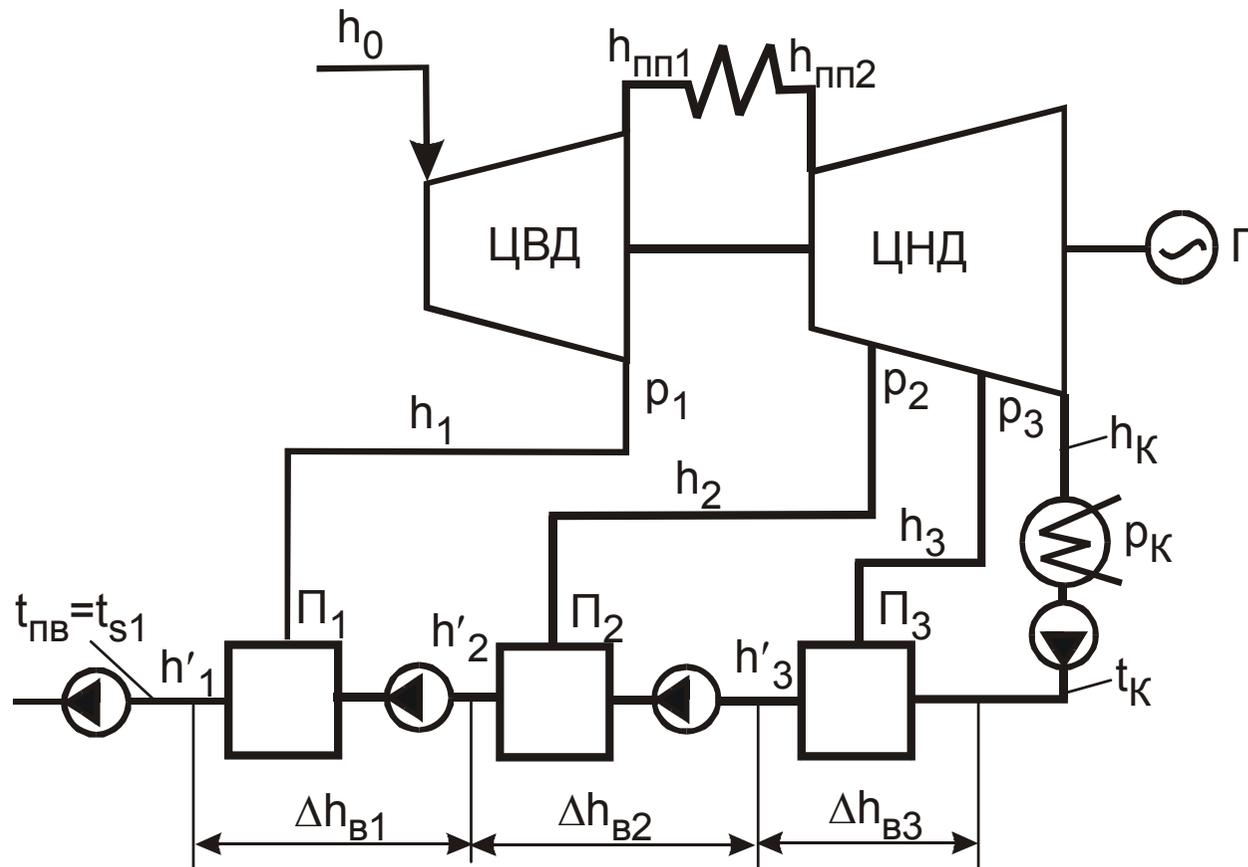
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2}{T_3} = \dots\dots\dots = \frac{T_{z-1}}{T_z} = \frac{T_z}{T_K}$$

При заданной температуре питательной воды

$$\frac{\Delta h_{B1}}{\Delta h_{B2}} = \dots\dots\dots = \frac{\Delta h_{B(z-1)}}{\Delta h_{Bz}} = m$$

$$m = z \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{П1}}}{\Delta h_{\text{ПК}}}}$$

Для паротурбинных установок с промперегревом пара



Инди́фферентная точка

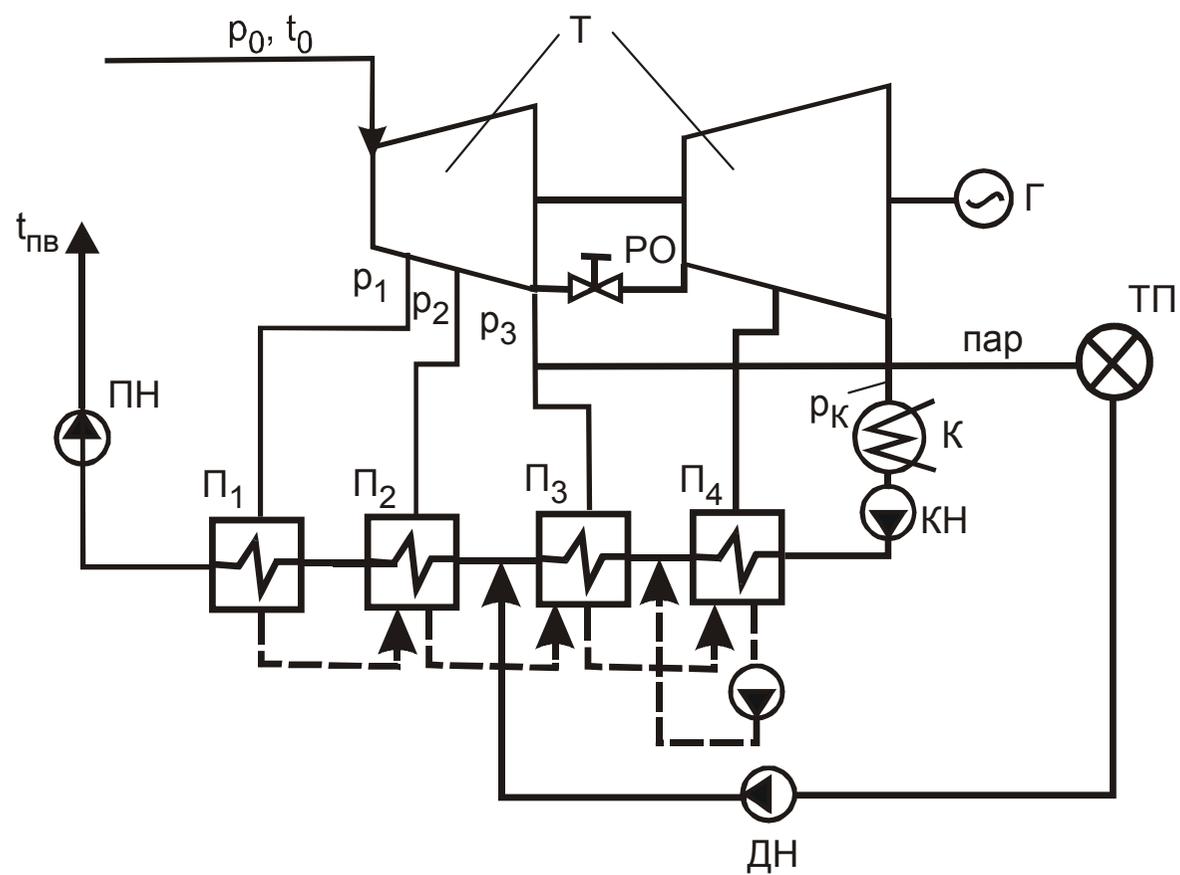
если до промперегрева расположен один отбор

$$\frac{\Delta h_{B1}}{\Delta h_{B2} + \Delta h_{ПП}} = \frac{\Delta h_{B2}}{\Delta h_{B3}} = m$$

$$\Delta h_{ПП} = (h_{ПП2} - h_{ПП1}) \frac{h_0 - h_{ПП1}}{h_0 - h'_1}$$

$$\Delta h_{B1} = 1,7 \cdot \Delta h_m$$

РППВ в теплофикационных ПТУ



Регенерация теплоты

Распределение подогрева воды между подогревателями в теплофикационных ПТУ

- I часть турбины – от входа до отбора
- II часть – от отбора до выхлопа из части низкого давления турбины

Технико-экономически оптимальная температура питательной воды

Выбор оптимальной $t_{ПВ}$ - комплексная технико-экономическая задача

Факторы, влияющие на выбор параметров регенерации

- единичная мощность агрегатов
- начальные параметры пара
- стоимость металла и топлива

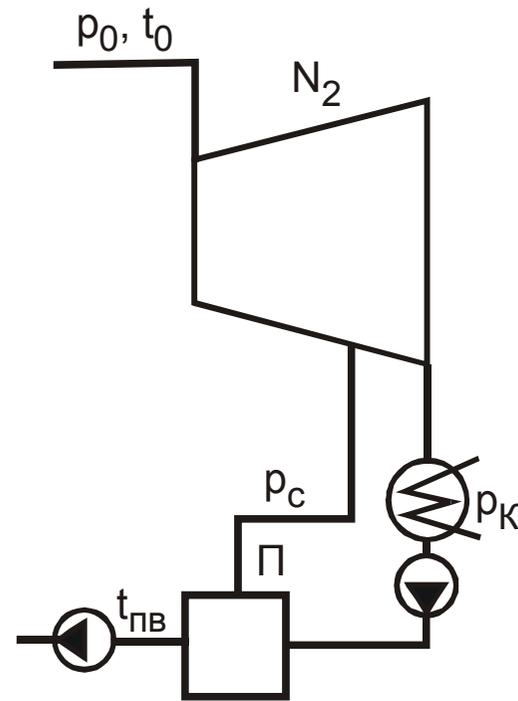
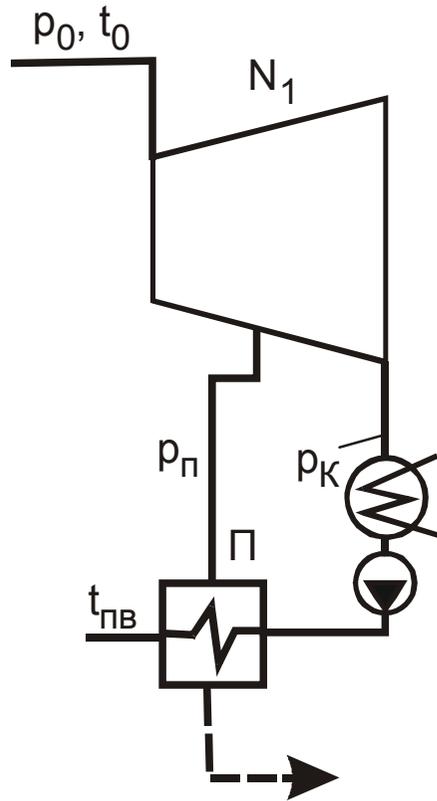
Параметры регенерации с учетом экономических факторов:

- Число регенеративных подогревателей 7– 9, за границей – до 11
- значение температуры питательной воды несколько ниже термодинамического оптимума

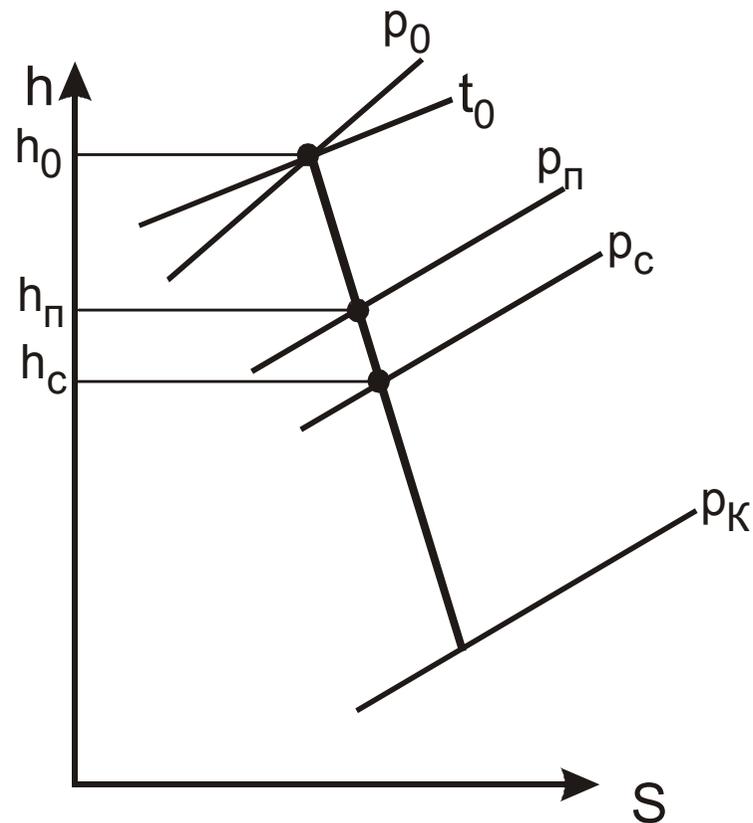
Сравнение регенеративных подогревателей поверхностного и смешивающего типов

Применение смешивающих подогревателей может
дать экономию топлива до 0,3 %

Температура питательной воды за подогревателями одинакова



Температура насыщения в поверхностном подогревателе выше, чем в смешивающем



Преимущества смешивающих подогревателей

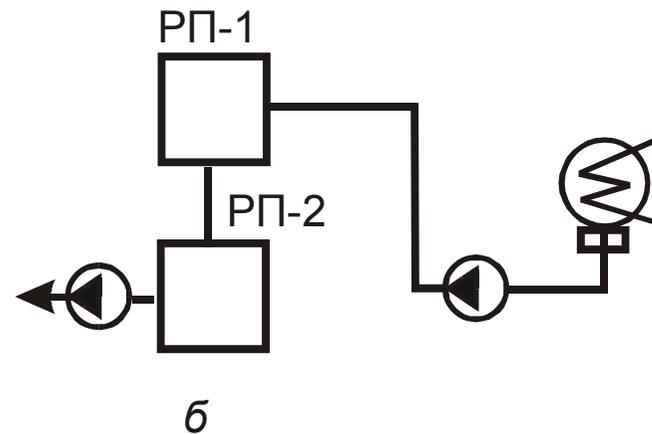
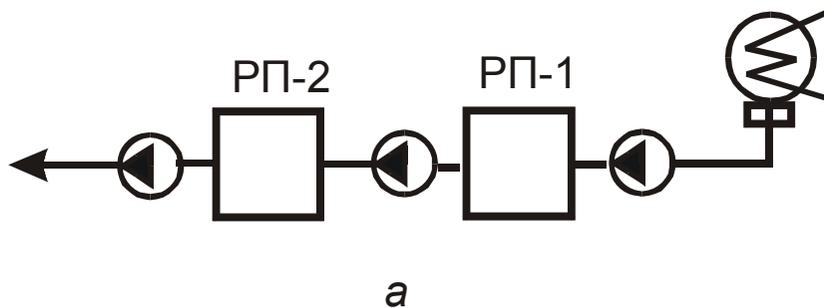
- проще конструкция
- меньше капитальные затраты в 1,4 – 1,8 раза
- высокая надежность
- проще в эксплуатации и ремонте
- экономичнее
- отсутствие недогрева
- Значительно меньше содержание окислов меди в питательной воде

Недостатки установки со смешивающими подогревателями

- необходимы дополнительные насосы для перекачки конденсата
- необходима защита от переполнения конденсатом и от заброса конденсата в турбину
 - ✱ при высоком давлении в отборе трудно обеспечить защиту от переполнения

- 
- В настоящее время смешивающими выполняют два первых регенеративных подогревателя низкого давления

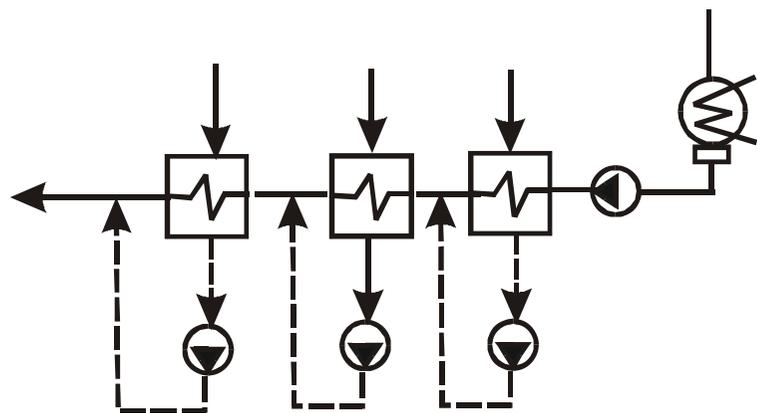
Схемы включения регенеративных подогревателей смешивающего типа



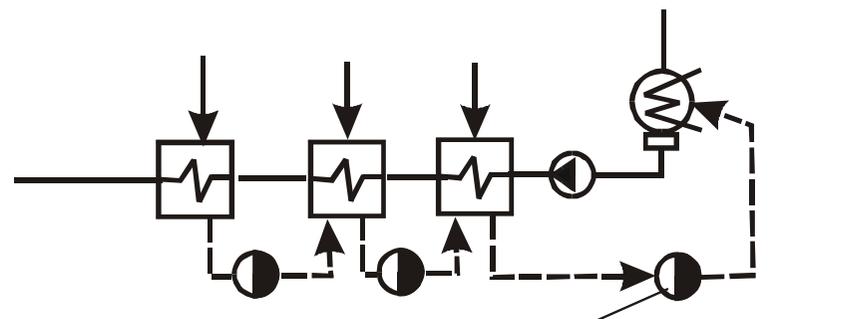
***Преимущества* поверхностных подогревателей**

- независимость давления воды и пара
- возможность использования одного насоса

Схемы включения регенеративных подогревателей поверхностного типа

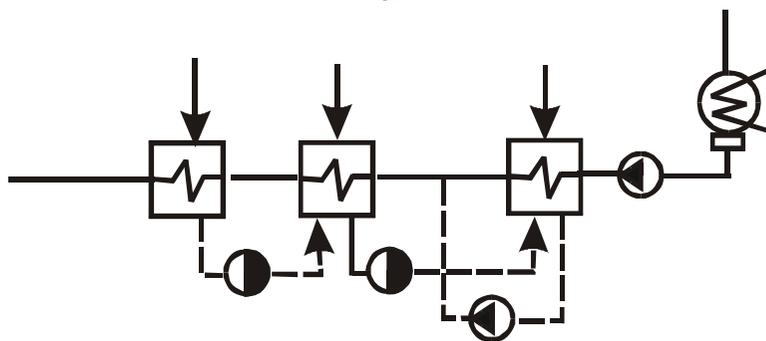


а

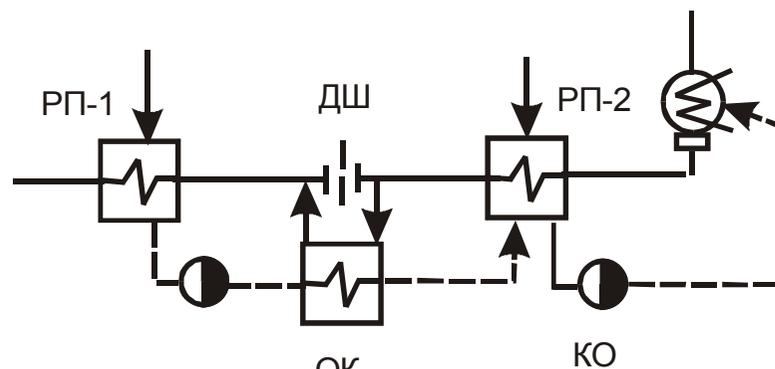


КОНДЕНСАТОТВОДЧИК

б



в



г

Схема «а» – с дренажными насосами у каждого подогревателя

- Тепловая экономичность этой схемы наиболее высокая

Из-за большой сложности схема «а» в чистом виде не применяется

Схема «а» (сложная)

- много насосов малой производительности с высоким напором, переменным расходом
- часть насосов подает воду с высокой температурой
- для надежной работы насосов надо устанавливать сборники конденсата на достаточной высоте

Схема «б» – с каскадным сливом конденсата

- Схема проста, насосы не требуются

Недостатки схемы «б»

- конденсат пара вытесняет отборный пар нижестоящих подогревателей
- дополнительные потери теплоты в конденсаторе
 - прямые
 - из-за недовыработки энергии отборным паром

Схема «в» - комбинированная

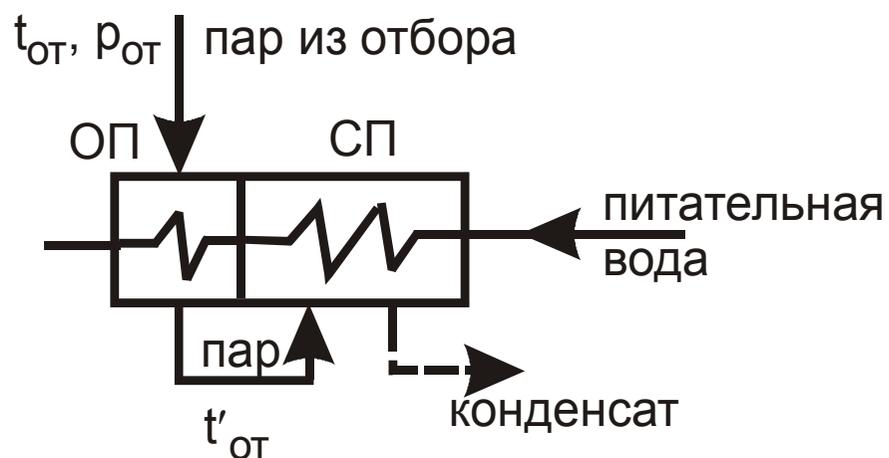
из последнего подогревателя конденсат
подаётся насосом в линию основного
конденсата

Охладитель конденсата в схеме «г»

- ***цель - уменьшение «вытеснения регенерации»***
- ***Температура конденсата на выходе из ОК на 10–15 °С выше температуры питательной воды, входящей в него***

Пароохладители

Регенеративный подогреватель с ОП

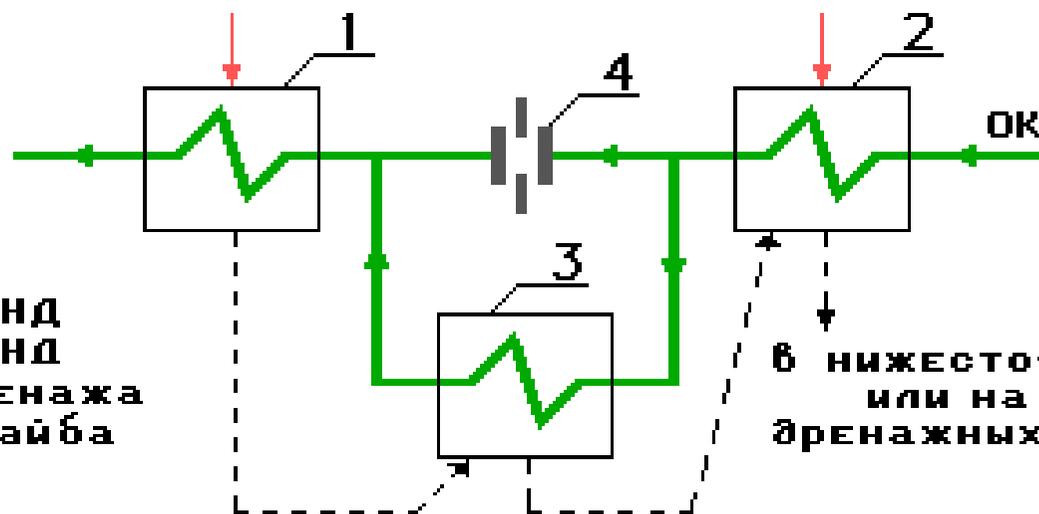


Температура пара после ОП на 15–20 °С выше температуры насыщения пара в подогревателе

Использование ОП дает

- более высокий подогрев воды
- увеличение суммарного количества отбираемого пара
- повышение эффективности регенерации

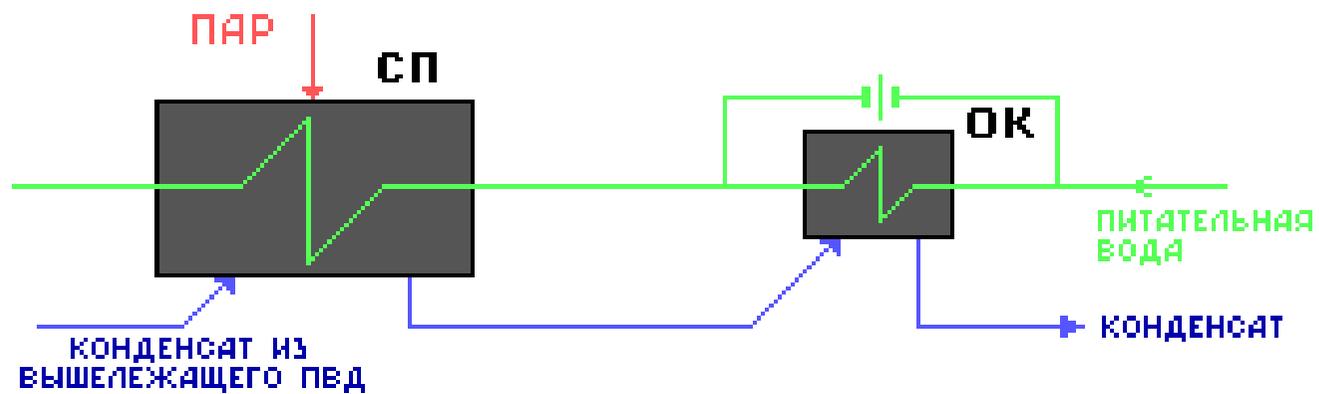
Схема ПНД с охладителем конденсата



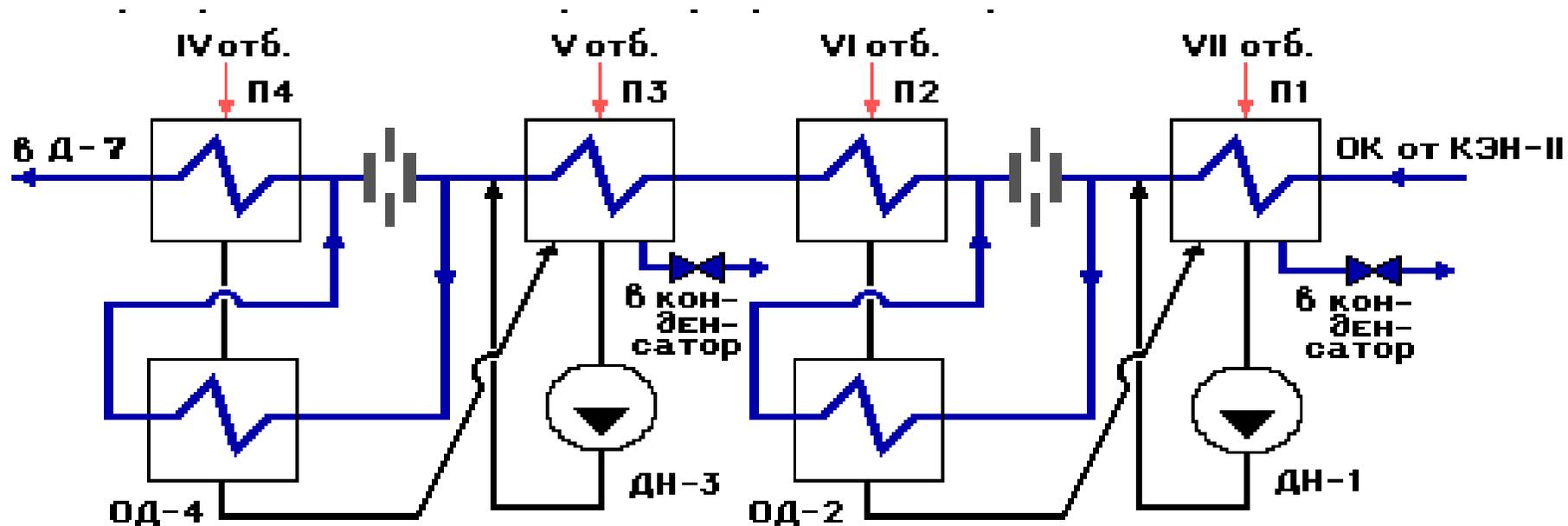
1. Вышестоящий ПНД
2. Нижестоящий ПНД
3. Охладитель дренажа
4. Дроссельная шайба

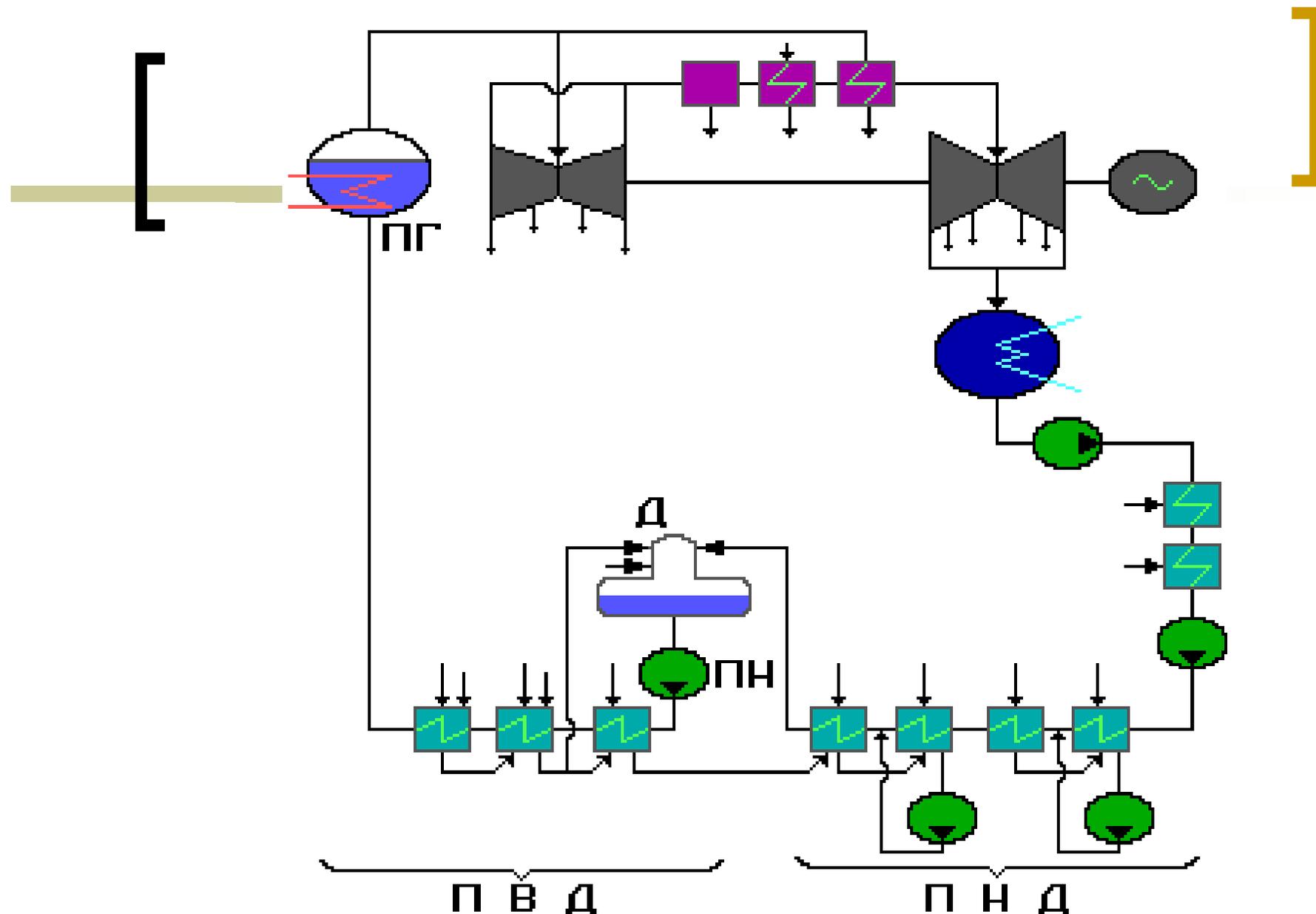
В нижестоящий ПНД
или на всаас
дренажных насосов

Схема ПВД с охладителем конденсата



Система регенерации НД К-1000-60/1500





ПВД **ПНД**
**Принципальная регенеративная
 схема турбоустановки АЭС**