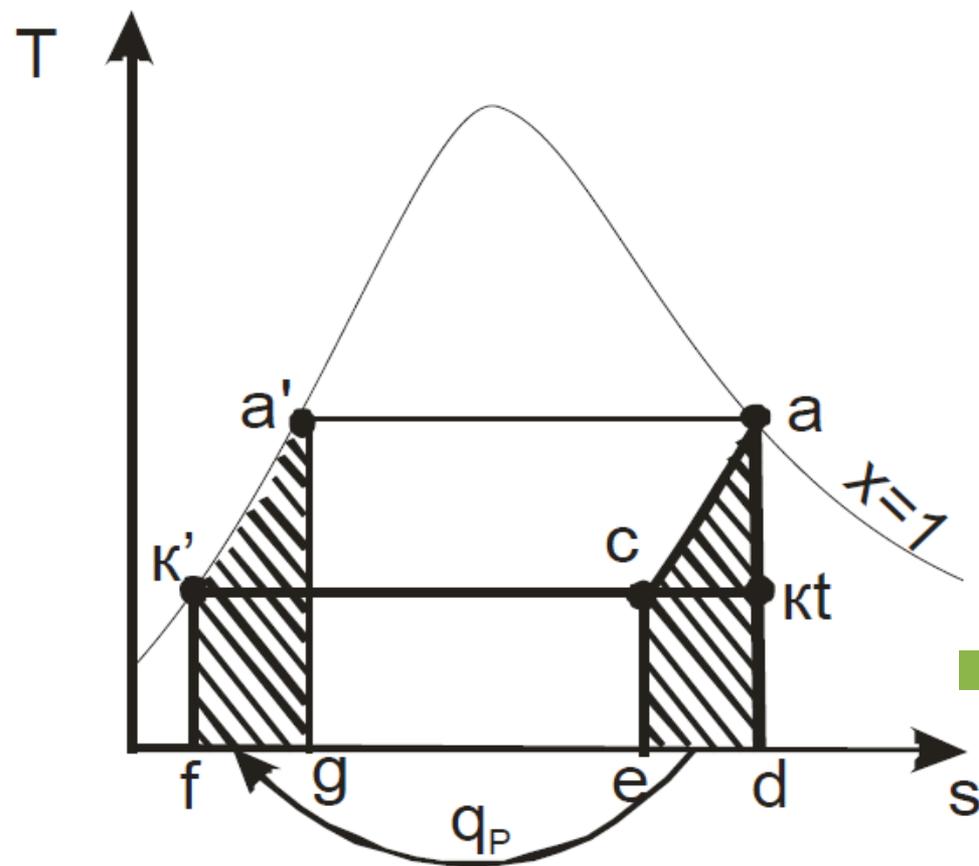




ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

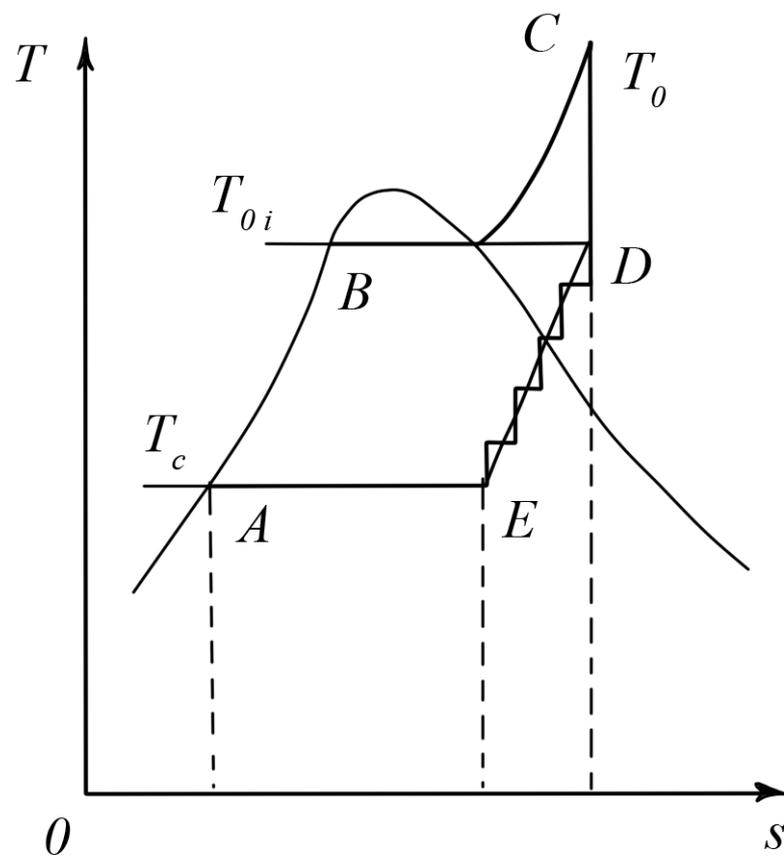
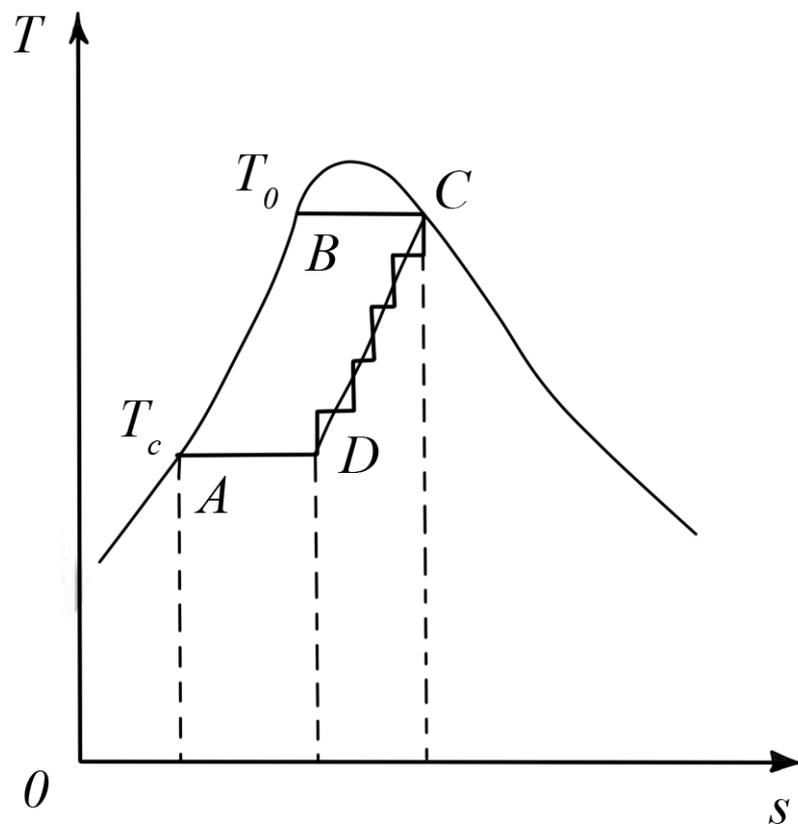
РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПОДОГРЕВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА КПД АЭС



- Для увеличения КПД АЭС необходимо увеличение температуры питательной воды на входе в парогенератор, т.к. это приведет к увеличению средней температуры подвода теплоты к циклу. Наиболее эффективный метод для повышения этой температуры является её регенеративный подогрев.
- Предельный теоретический цикл с регенерацией выглядит следующим образом.

КОНЕЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ



КОНЕЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ

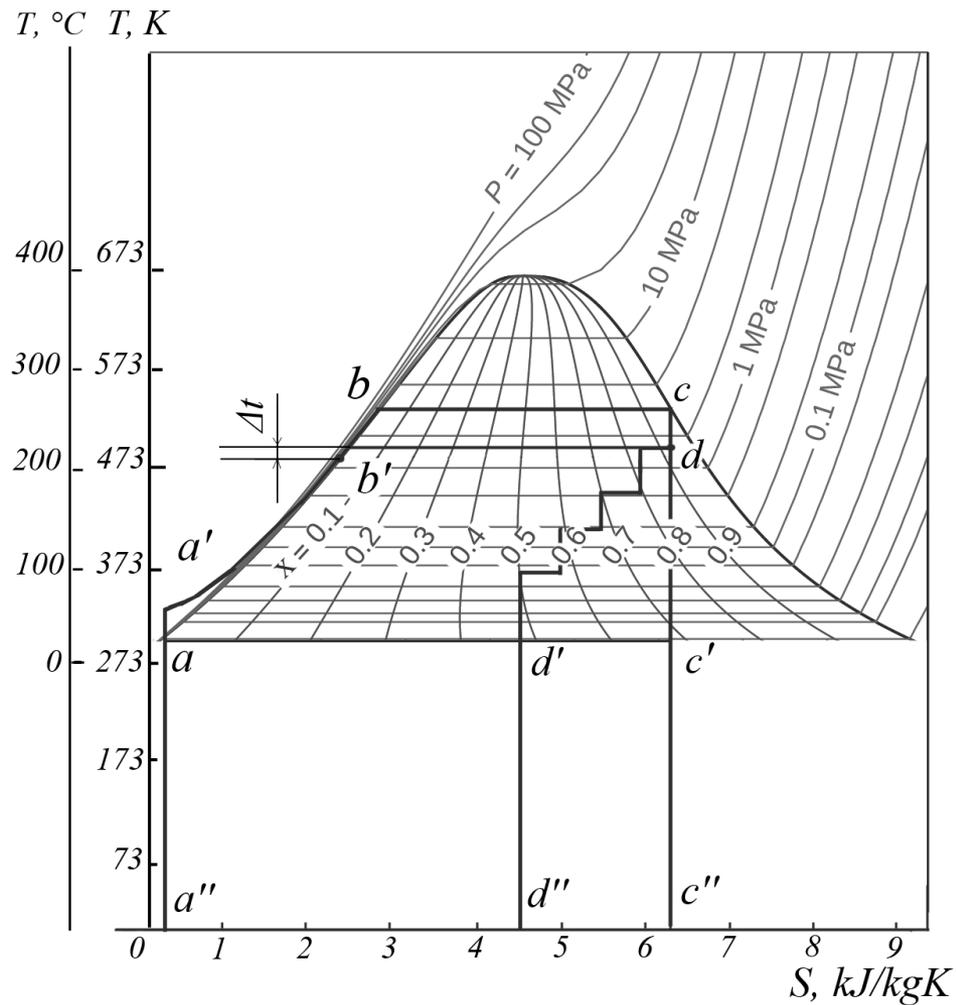
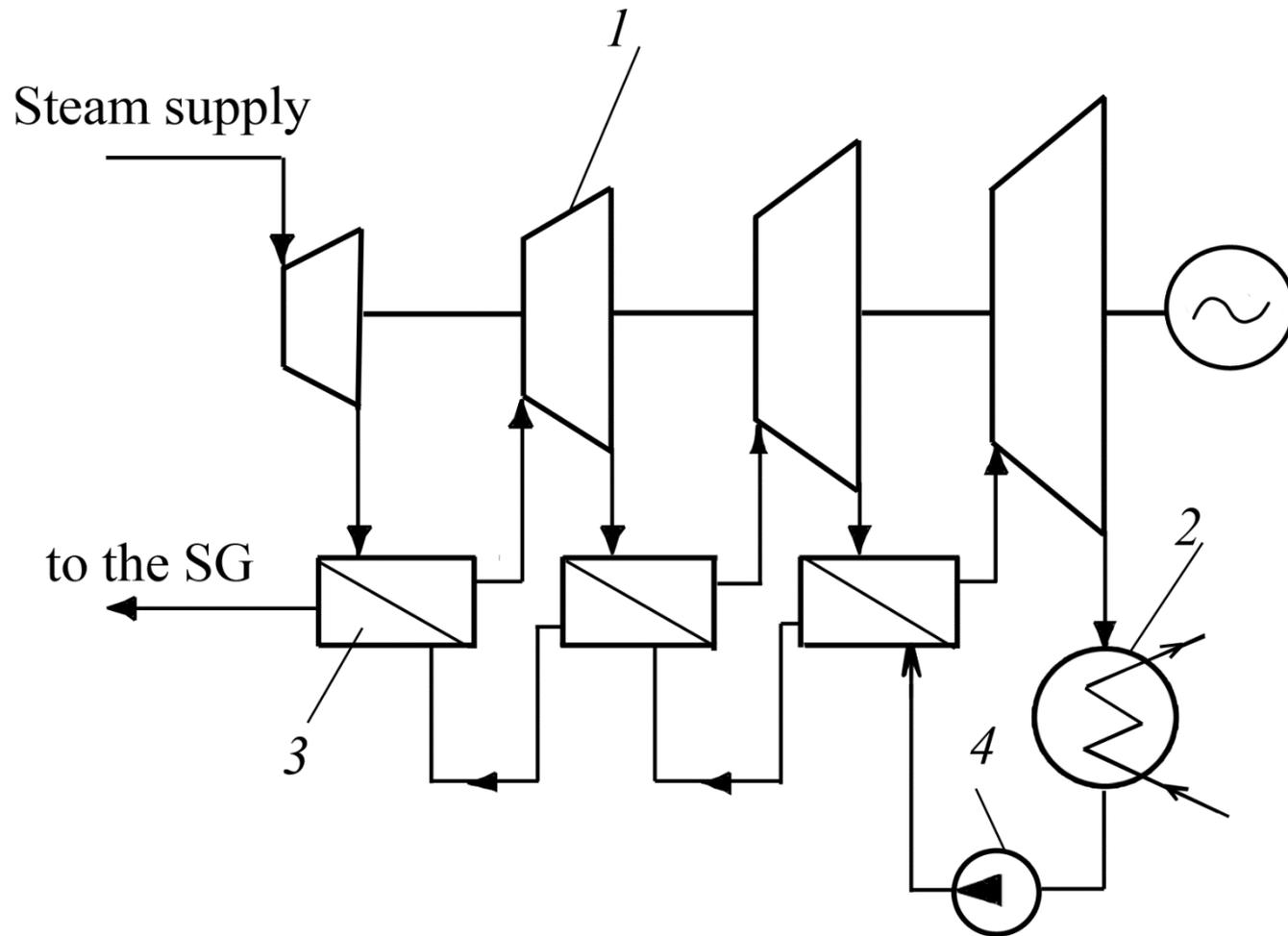


СХЕМА КОНЕЧНОГО ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ



СОСТАВ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА

Одна стадия регенеративного подогрева включает:

- Отбор пара;
- Подогреватель;
- паропровод;
- Насос (опционально);
- Дренаж (опционально).

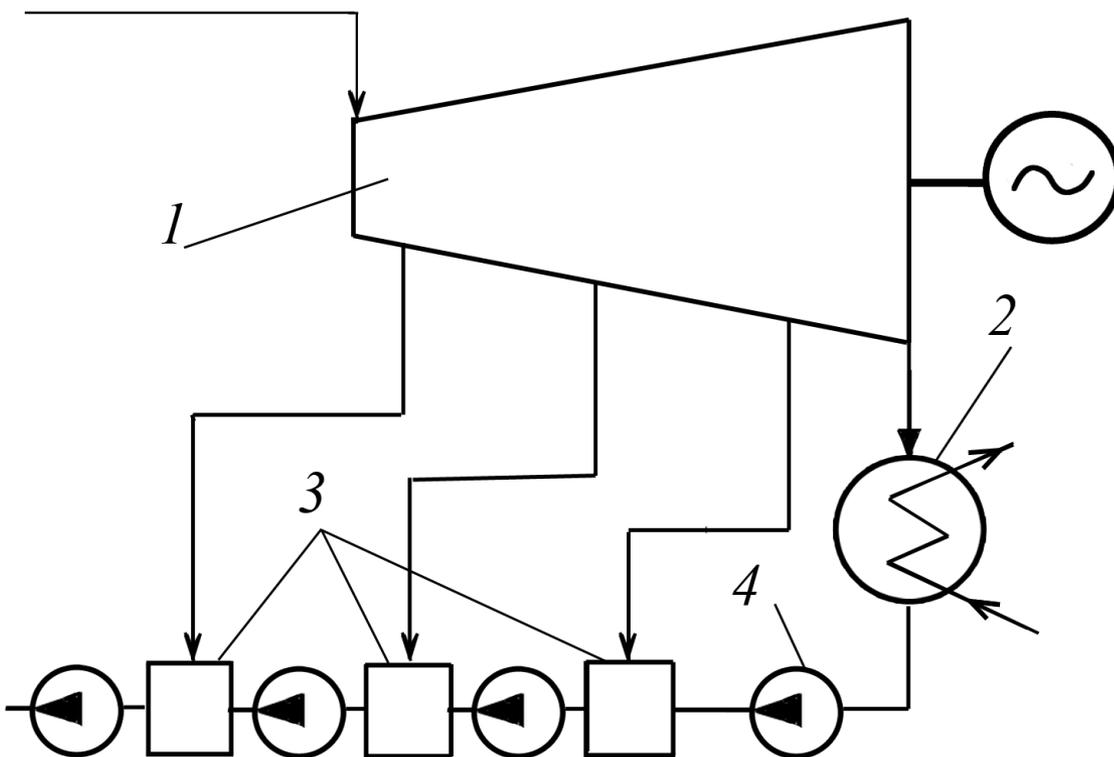
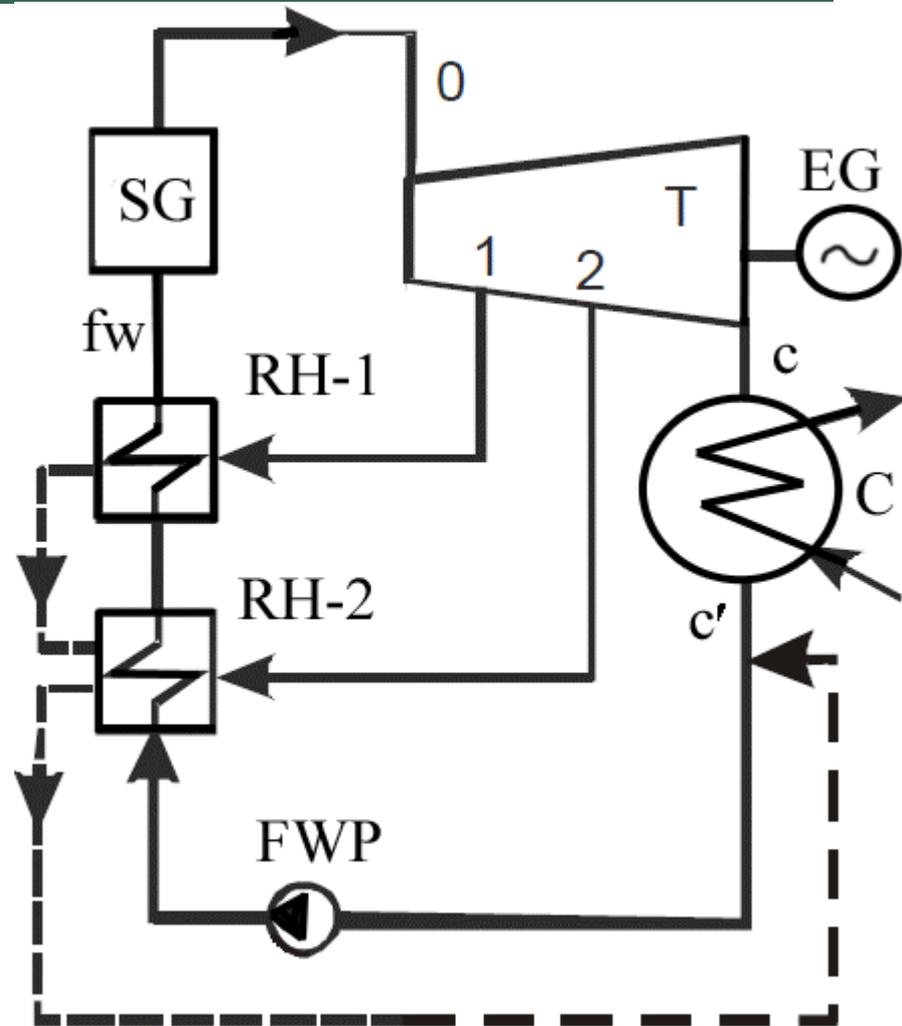
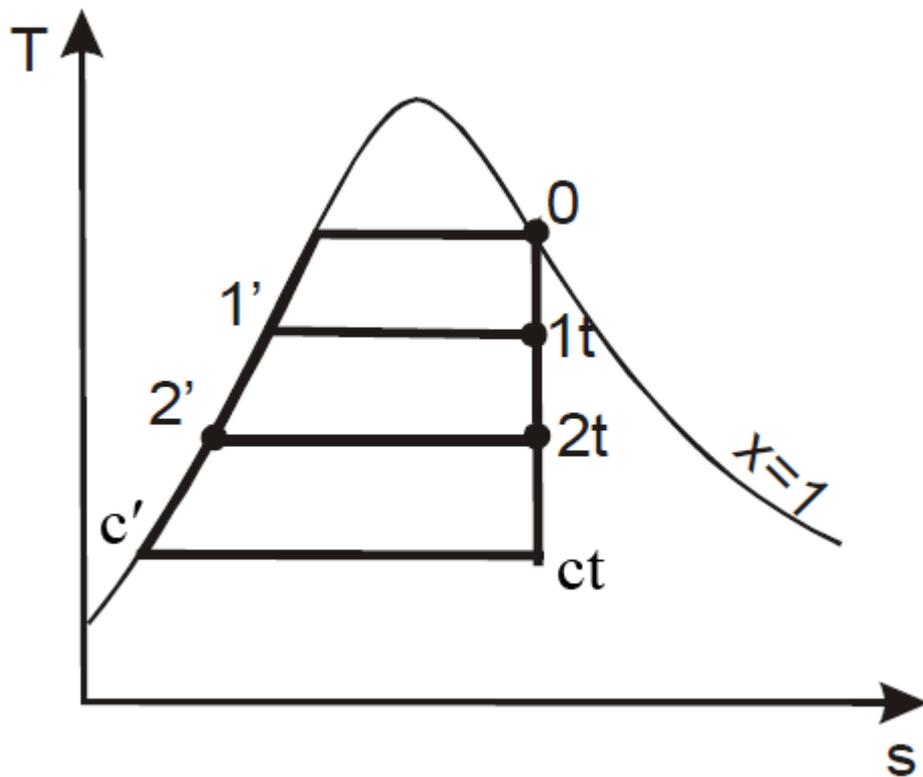


СХЕМА И ЦИКЛ АЭС С ДВУМЯ СТУПЕНЯМИ РППВ



ПАРАМЕТРЫ АЭС С РППВ

- Теплоперепад турбины с n количеством ступеней:

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

- Заменяя $\alpha_c = 1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j$ получим:

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

ПАРАМЕТРЫ АЭС С РППВ

- Коэффициент недовыработки:

$$y_j = \frac{h_j - h_c}{h_0 - h_c}$$

- Теплоперепад турбины, записанный через y_j :

$$H_i^p = h_0 - h_c - \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_j - h_c) = H_i \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j y_j \right)$$

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА СТЕПЕНЕЙ РППВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭС

■ Мощность турбины 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 с РППВ:

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

***Прим.** Внедрение регенерации приводит к росту расхода пара на турбину.*

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

КПД АЭС с РППВ

■ Теоретический термический КПД АЭС с РППВ:

$$\eta_t^p = \frac{H_0^p}{q_1^p} = \frac{H_0^p}{h_0 - h_{fw}} = \frac{\alpha_c (h_0 - h_{ct}) + \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_0 - h_{jt})}{h_0 - h_{fw}}$$

■ Действительный термический КПД АЭС с РППВ:

$$\eta_t^p = \frac{H_i^p}{q_1^p} = \frac{H_i^p}{h_0 - h_{fw}} = \frac{\alpha_c (h_0 - h_c) + \sum_{j=1}^n \alpha_j (h_0 - h_j)}{h_0 - h_{fw}}$$

ВЛИЯНИЕ РППВ НА КПД АЭС

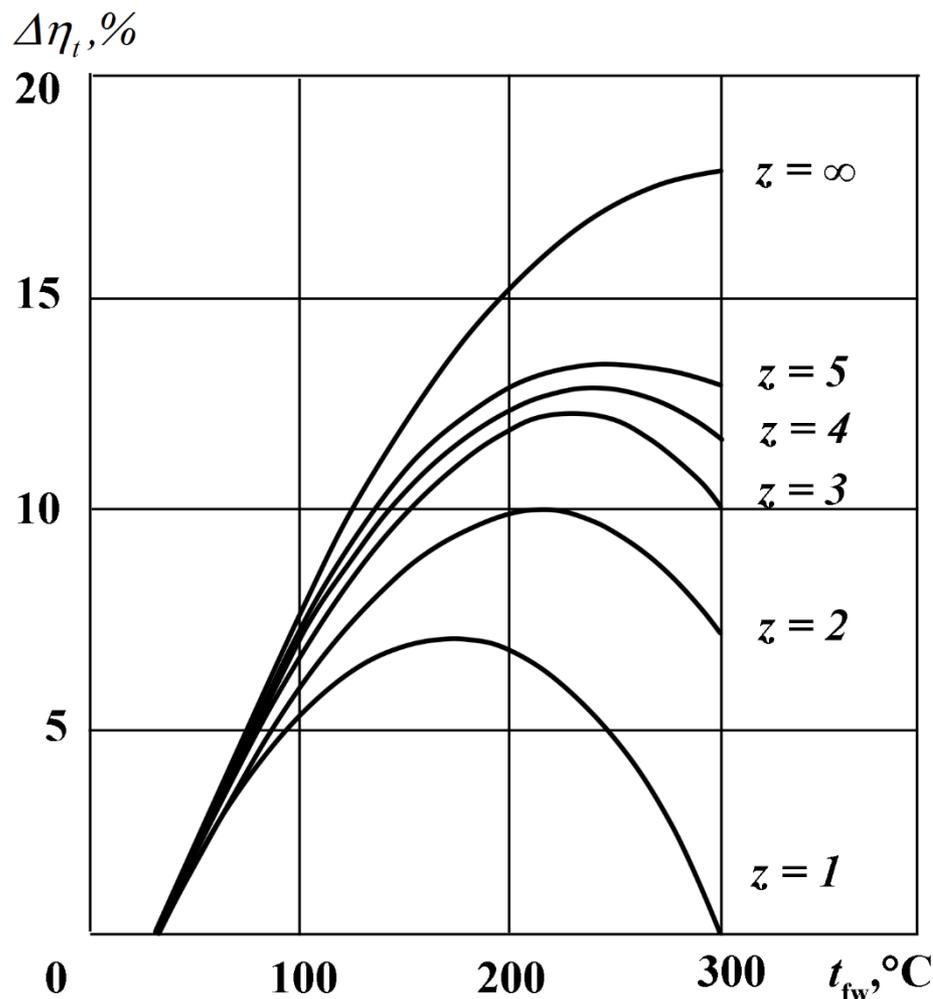
- Энергетический коэффициент регенерации:

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

- Теоретическая эффективность АЭС с РППВ:

$$\eta_i^{reg} = \eta_i^p \frac{1 + A^p}{1 + A^p \cdot \eta_i^p}$$

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ РППВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЭС



- Увеличение числа ступеней приводит к росту КПД турбоустановки.
- Имеет место оптимальная температура питательной воды.
- Оптимальная температура увеличивается с ростом числа ступеней РППВ.
- С каждой дополнительной ступенью РППВ прирост КПД снижается.

На практике применяется 7-8 ступеней РППВ, что приводит к росту КПД турбоустановки на 15-17 %.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДОГРЕВА ПО СТУПЕНЯМ РППВ

- Максимальный КПД АЭС достигается при равномерном распределении параметров подогрева питательной воды по ступеням.

$$\frac{\Delta h_{w1}}{\Delta h_{w2}} = \dots = \frac{\Delta h_{w(z-1)}}{\Delta h_{wz}} = m \quad m = \sqrt[z]{\frac{\Delta h_{s1}}{\Delta h_{sc}}} \quad \left[\begin{array}{l} \Delta h_{s1} = h_1 - h'_1 \\ \Delta h_{sc} = h_c - h'_c \end{array} \right.$$

$$\Delta h_{wn} = \frac{h'_0 - h'_c}{z + 1}$$

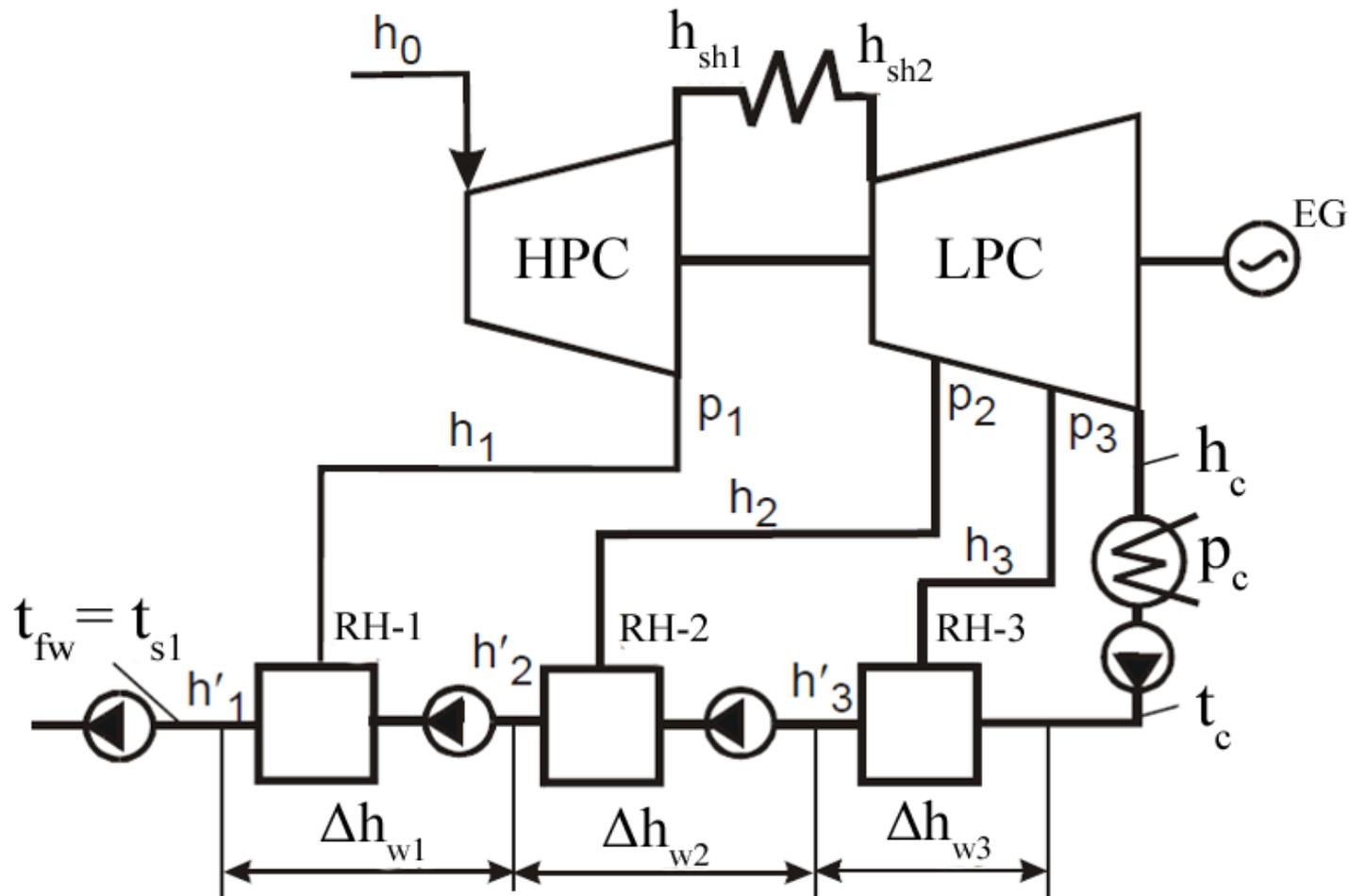
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДОГРЕВА ПО СТУПЕНЯМ РППВ

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

$$\Delta s = \frac{s'_0 - s'_c}{z + 1}$$

$$\Delta s = \frac{s_{fw} - s'_c}{z}$$

ИНДИФФЕРЕНТНАЯ ТОЧКА



ИНДИФФИРЕНТНАЯ ТОЧКА

$$\frac{\Delta h_{w1}}{\Delta h_{w2} + \Delta h_{sh}} = \frac{\Delta h_{w2}}{\Delta h_{w3}} = m$$

$$\Delta h_{sh} = (h_{sh2} - h_{sh1}) \frac{h_0 - h_{sh1}}{h_0 - h_1'}$$

$$\Delta h_{w1} = 1.7 \cdot \Delta h_m$$

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РППВ

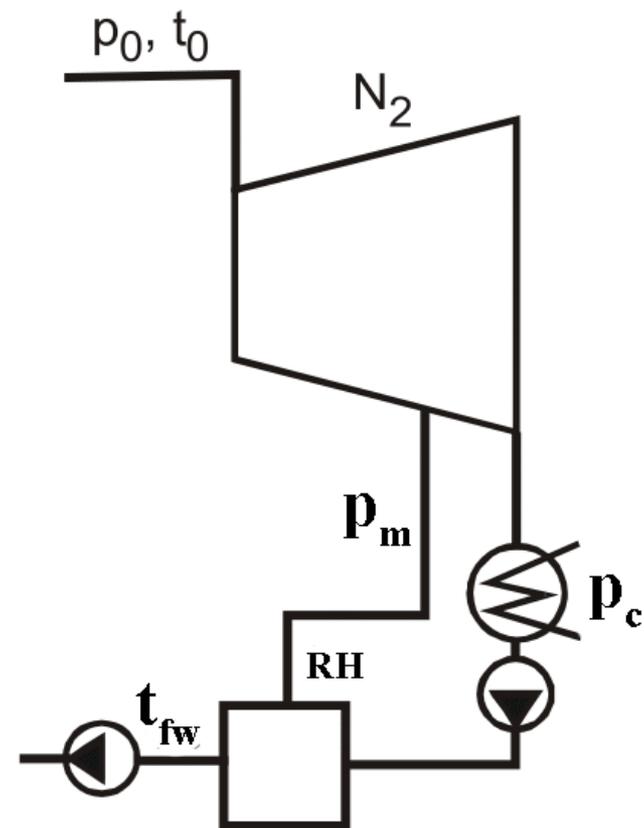
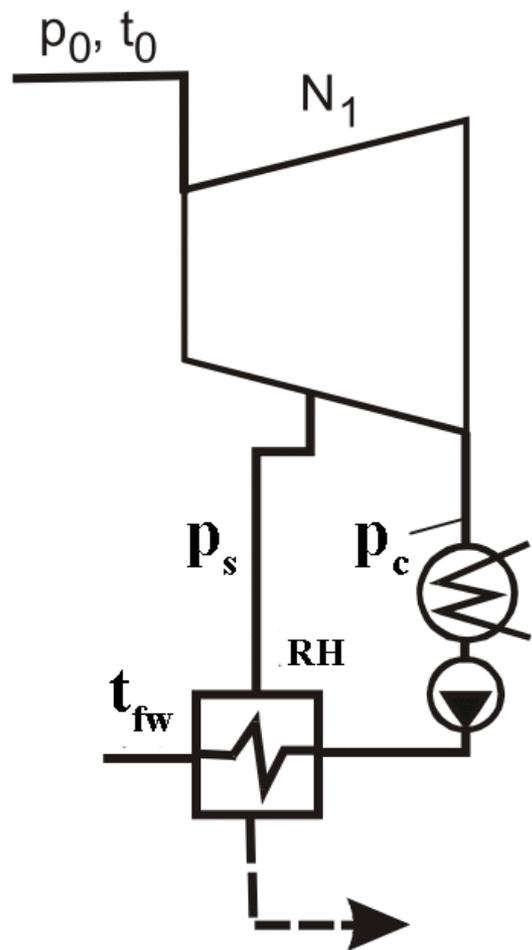
Практический выбор оптимальной температуры питательной воды представляет собой результат технико-экономического расчета.

Факторы, влияющие на данный параметр:

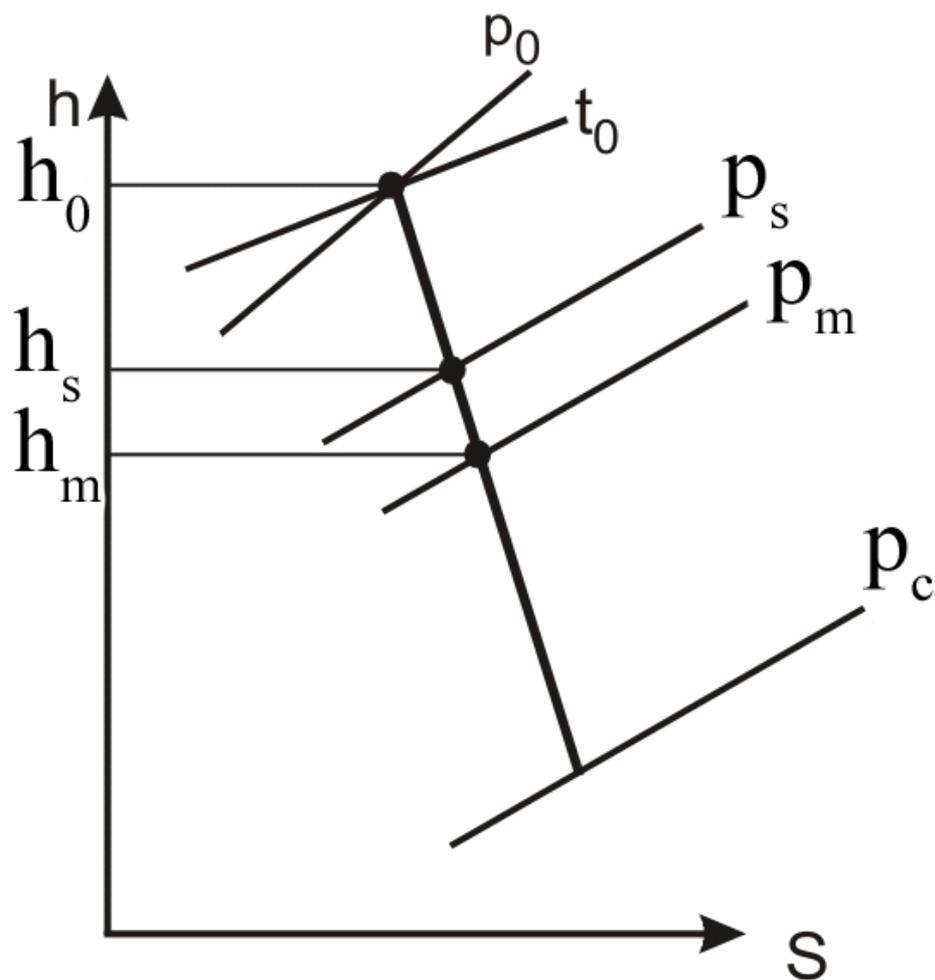
- Удельная мощность оборудования;
- Начальные параметры пара;
- Стоимость оборудования и топлива.

В результате в России используется 7-8 ступеней РППВ, за рубежом (особенно в странах с высокой стоимостью топлива и электроэнергии) данное число достигает 11.

ТИПЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ



ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ НА ДАВЛЕНИЕ В ОТБОРЕ



СМЕШИВАЮЩИЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ

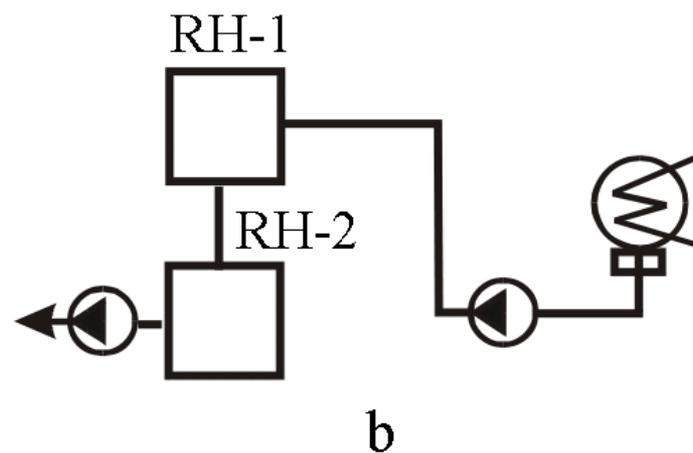
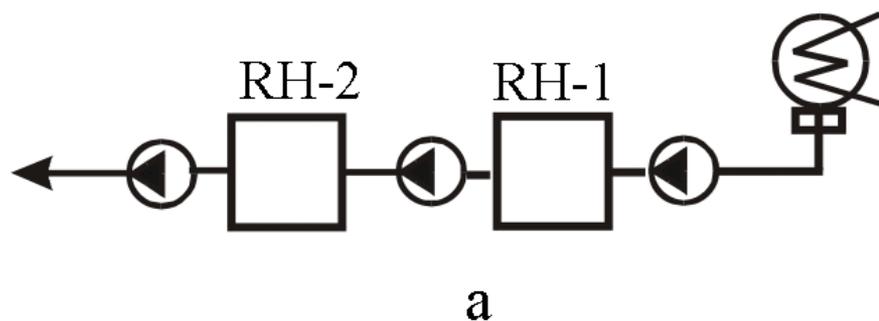
Достоинства:

- Простота;
- Низкая стоимость;
- Высокая надежность;
- Простота эксплуатации и ремонта;
- Меньшие концентрации оксидов металлов и накипи.
- **ОТСУТСТВИЕ НЕДОГРЕВА.**

Недостатки:

- Необходимость установки дополнительного насоса;
- Необходимость дополнительной защиты от уноса влаги.

СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ СМЕШИВАЮЩИХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ



Подогреватели смешивающего типа используются для подогрева конденсата в линии низкого давления.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ

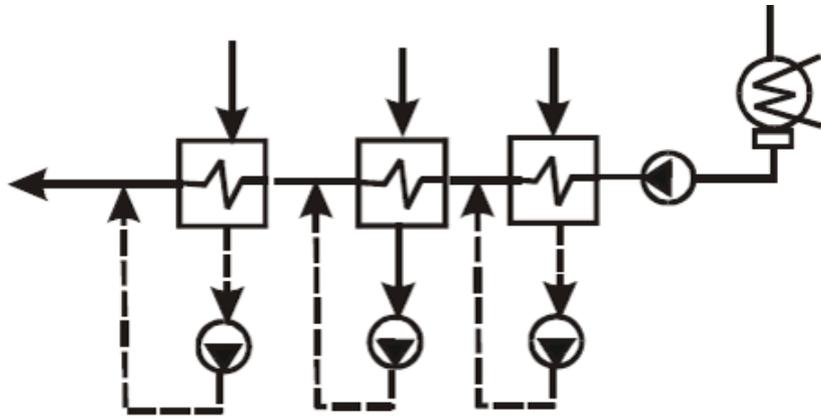
Достоинства:

- Независимость параметров воды и пара;
- Возможность использования одного насоса.

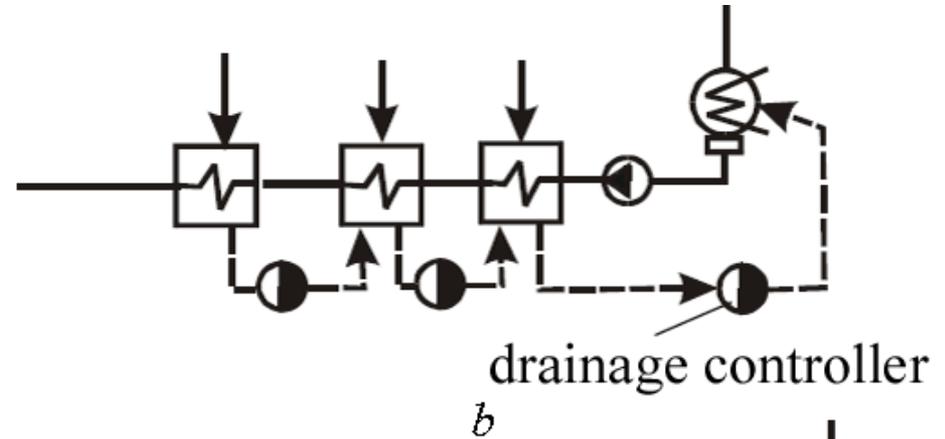
Недостатки:

- Сложность конструкции;
- Меньшая надежность;
- Высокая стоимость;
- **ПРИСУТСТВИЕ НЕДОГРЕВА.**

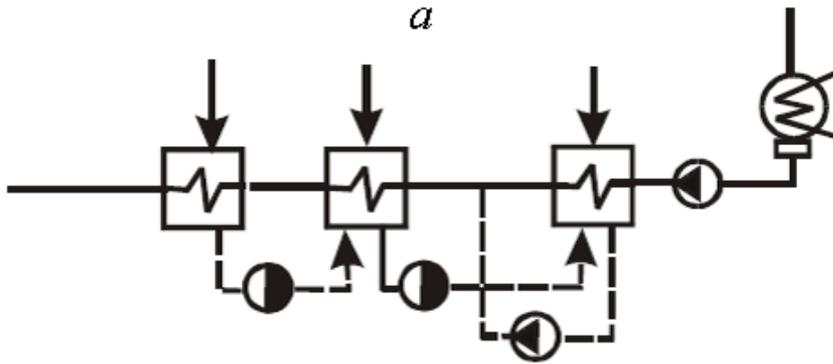
СХЕМЫ УСТАНОВКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ



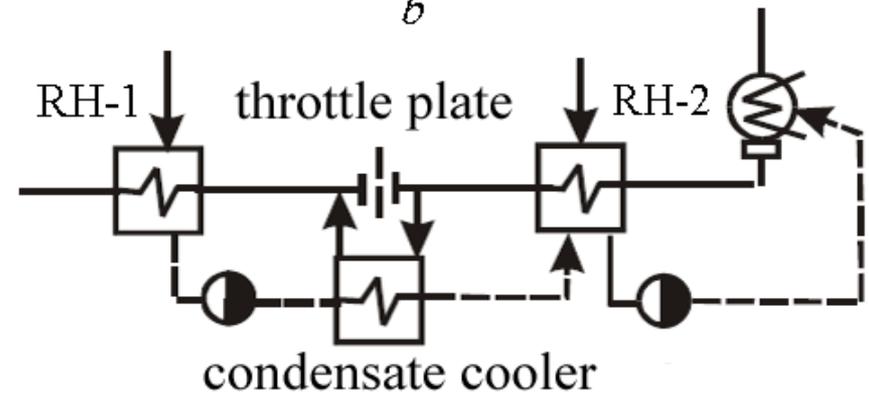
a



b



c

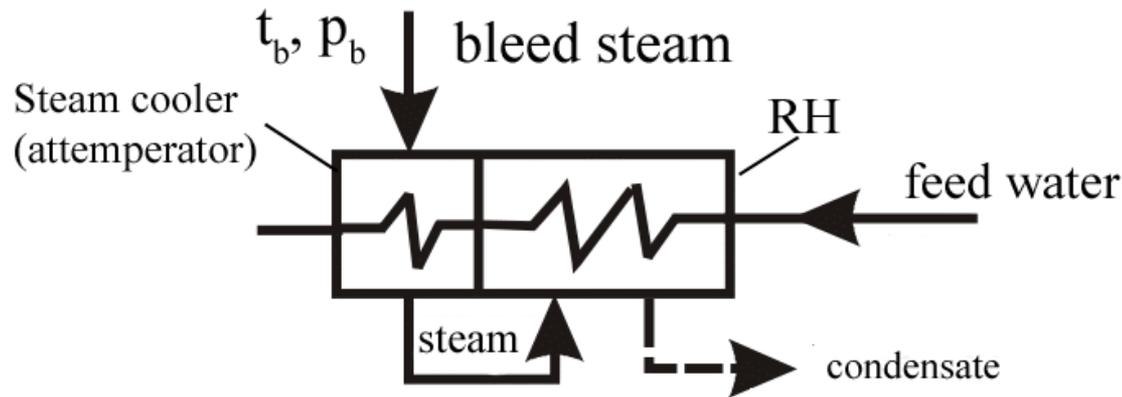


d

СРАВНЕНИЕ СХЕМ

Схема	Достоинства	Недостатки
A	Высокая эффективность	Большое число насосов
B	Простота Отсутствие насоса	Вытеснение пара в отборах Дополнительные потери в конденсаторе
C	Промежуточные варианты между A и B Цель: снижение вытеснения пара Характерная особенность: температура дренажа в охладителе выше температуры питательной воды на 10-15 °С.	
D		

ОХЛАДИТЕЛЬ ПАРА

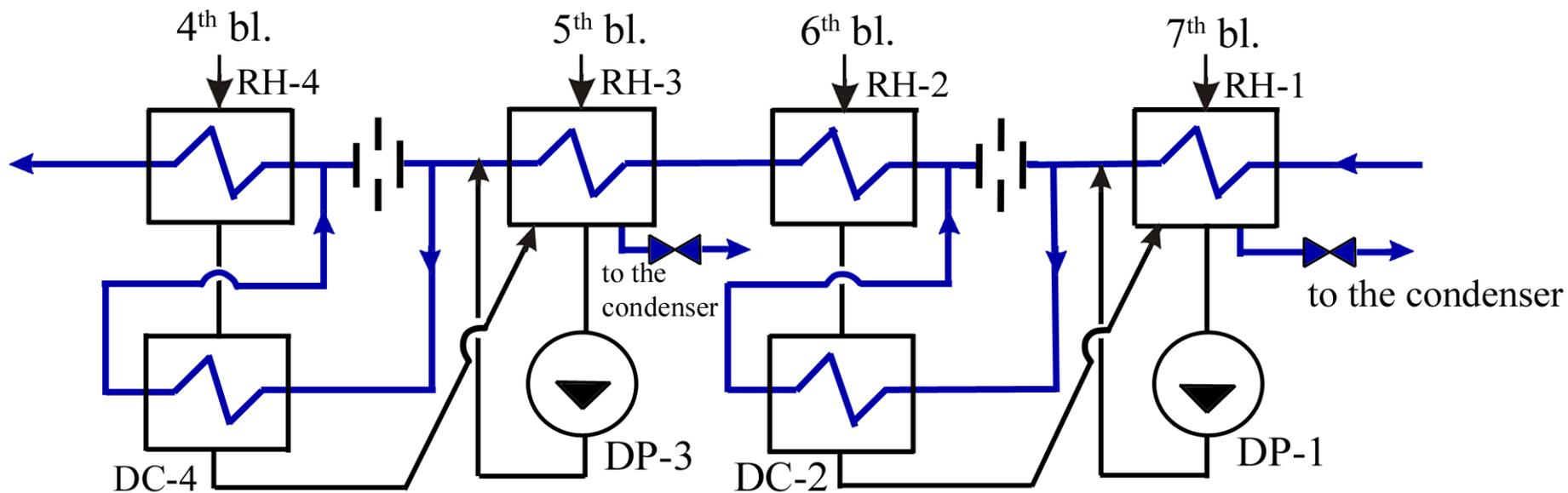
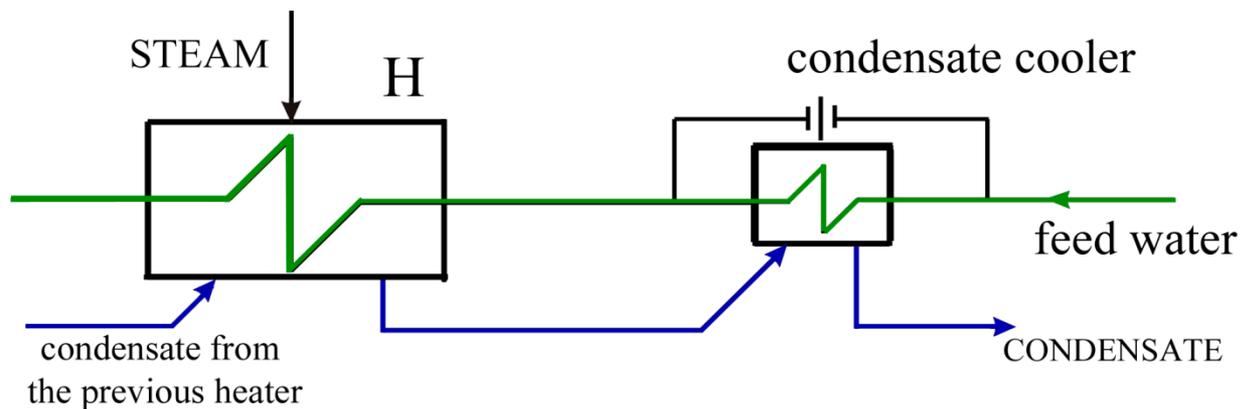


Температура пара после охладителя на 10-15 °С выше температуры насыщения при давлении в подогревателе.

Использование пароохладителя приводит к:

- *Повышению температуры питательной воды на выходе;*
- *Повышению эффективности регенерации;*
- *Увеличению расхода пара на отбор.*

ОХЛАДИТЕЛЬ КОНДЕНСАТА





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!