



Атомные электрические станции

Тема 9. **КОНДЕНСАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ**



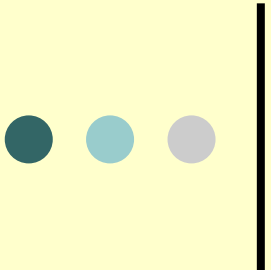
Основные вопросы

- Назначение
- Вредное действие неконденсирующихся газов
- Состав и схема конденсационной установки
- Давление в конденсаторе
- Переохлаждение конденсата
- Конструкция конденсатора



Назначение конденсационной установки

- ✿ конденсация пара
- ✿ получение чистого конденсата
- ✿ установление и поддержание глубокого разрежения за последней ступенью турбины



Влияние конечного давления на экономичность турбоустановки

Повышение конечного давления на **1 кПа** снижает КПД турбоустановки АЭС на **1,5-2 %**

Расчетное конечное давление

- ❑ на мощных ТЭС и АЭС 3,5 - 5,5 кПа
- ❑ для ТЭЦ и АТЭЦ 6 - 10 кПа



Процесс конденсации

- чем ниже температура охлаждающей воды,
тем
- ниже температура конденсирующегося пара
- его давление



В конденсатор попадает воздух

через находящиеся под разрежением неплотности:

- в турбине
- паропроводах
- в конденсаторе
- неплотности фланцев
- уплотнения
- арматуры
- ПНД



Наибольшая величина присоса воздуха

Мощность, МВт		300	500	800	1000
Предельная величина присоса воздуха $G_{в}^{макс}$, кг/ч	Для ТЭС	30	40	60	—
	Для АЭС	—	60	—	120

при нагрузках от 40 до 100 %



Другие газы

- углекислота и аммиак
- продукты радиоллиза и РБГ - в одноконтурных АЭС



Вредное действие неконденсирующихся газов

- коррозия конденсатного тракта
- ухудшение процесса теплопередачи

Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке:

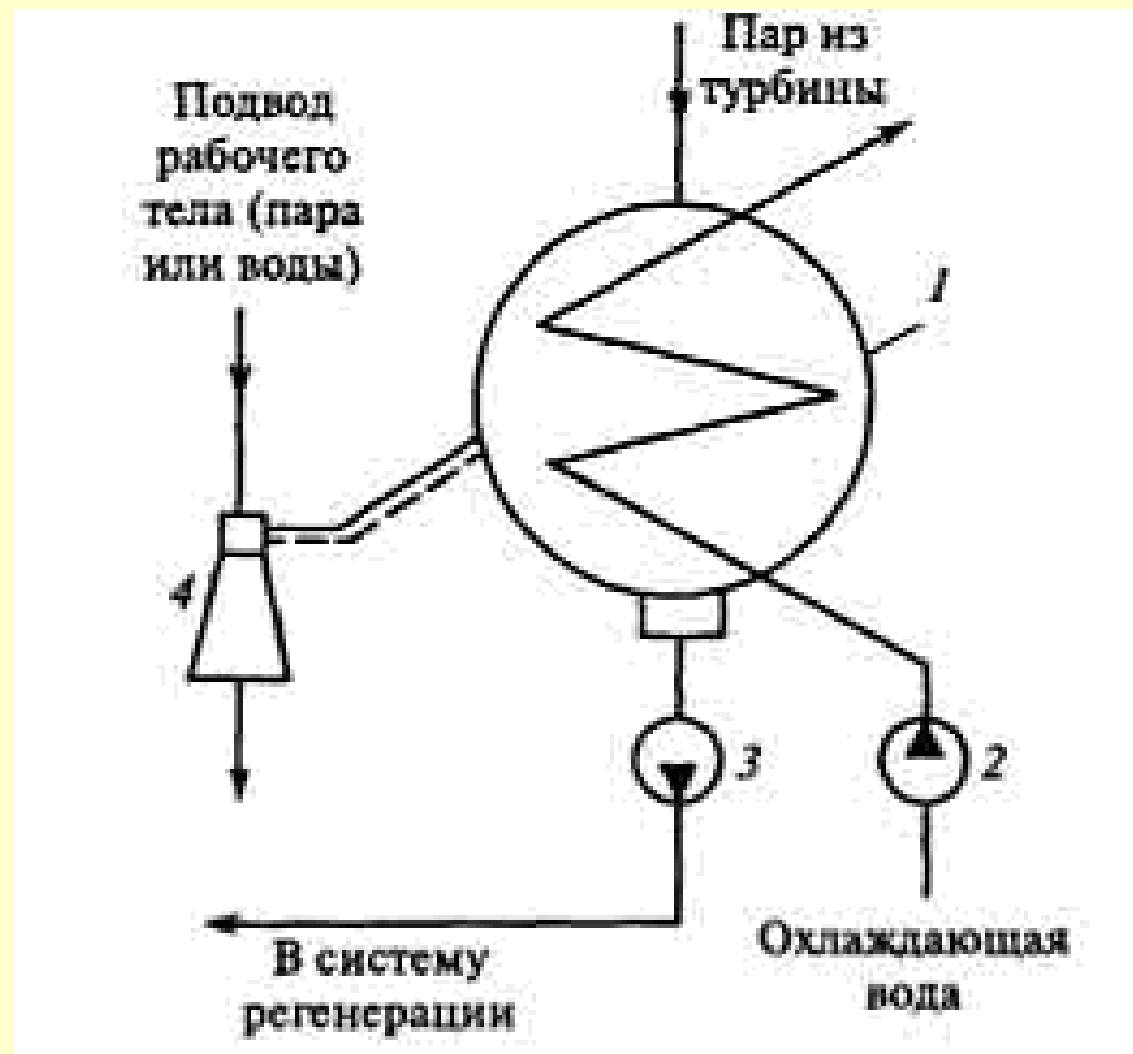
- при концентрации газов **1% вдвое** меньше, чем в чистом паре
- при **2,5 - 3,0 %** - в **четыре** раза меньше



Состав конденсационной установки

- конденсатор
- конденсатные насосы
- воздухоотсасывающие устройства
- трубопроводы

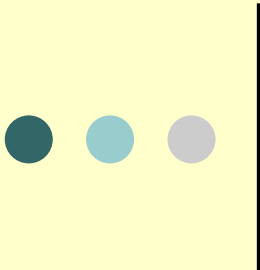
Принципиальная схема конденсационной установки





Эжекторы

- эжектирующее действие пара, имеющего большую скорость
- вместе с воздухом удаляется некоторое количество несконденсировавшегося пара



Температура конденсата t_k

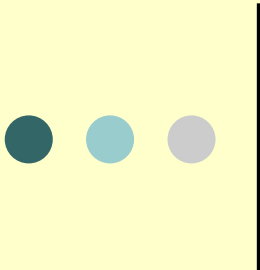
всегда $t_k > t_{B2}$

Температурный напор $\delta t = t_k - t_{B2} = 3 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$t_{B2} > t_{\text{OX.B}}$$
$$\Delta t_B = t_{B2} - t_{\text{OX.B}}$$

Температура конденсата

$$t_k = t_{\text{OX.B}} + \Delta t_B + \delta t$$



Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_{\text{ох.в}}$

зависит от:

- источника и типа водоснабжения
- климатических условий
- времени года

При проектировании АЭС среднегодовую расчетную температуру принимают:

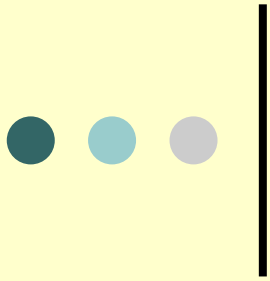
- для АЭС - 10, 12, 15 или 20 °С
- для АТЭЦ - 20 или 27 °С



Давление в конденсаторе

По закону Дальтона :

$$p_{\text{см}} = p_{\text{п}} + p_{\text{в}}$$



Используя $pV=RT$ для каждого компонента смеси
с учетом

$$T_{\Pi} = T_{\text{В}}$$
$$a V_{\text{В}} = V_{\Pi} = V$$

$$\frac{p_{\text{В}}}{p_{\Pi}} = \frac{G_{\text{В}}}{G_{\Pi}} \frac{R_{\text{В}}}{R_{\Pi}}$$



При параметрах в конденсаторе

$$R_B / R_{\Pi} \approx 0,622$$

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\text{см}}}{1 + 0,622 \sqrt{j_{\Pi}}}$$



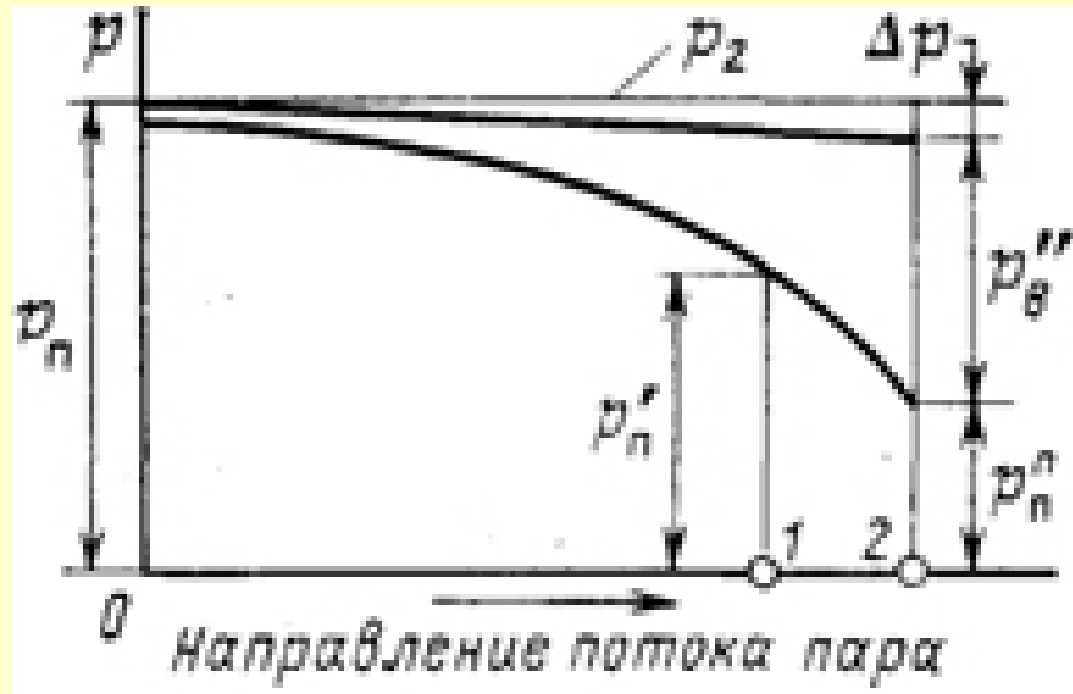
- На входе пара в конденсатор разница в давлениях ничтожна:

$$\text{при } p_{\text{см}} = 5,00 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{см}} - p_{\text{п}} = 0,03 \text{ кПа}$$

- По мере движения пара через конденсатор \bar{G}_e растёт и $p_{\text{п}}$ уменьшается
- В месте отсоса паровоздушной смеси содержание воздуха значительно

Изменение давлений p_n и p_v по ходу пара от горловины конденсатора до места отсоса



0 - вход в конденсатор; 1 - начало воздухоохладителя;
2 - отсос паровоздушной смеси



Переохлаждение конденсата

- Разность температур пара t_K и конденсата в конденсатосборнике t'_K

$$\Delta t_K = t_K - t'_K$$

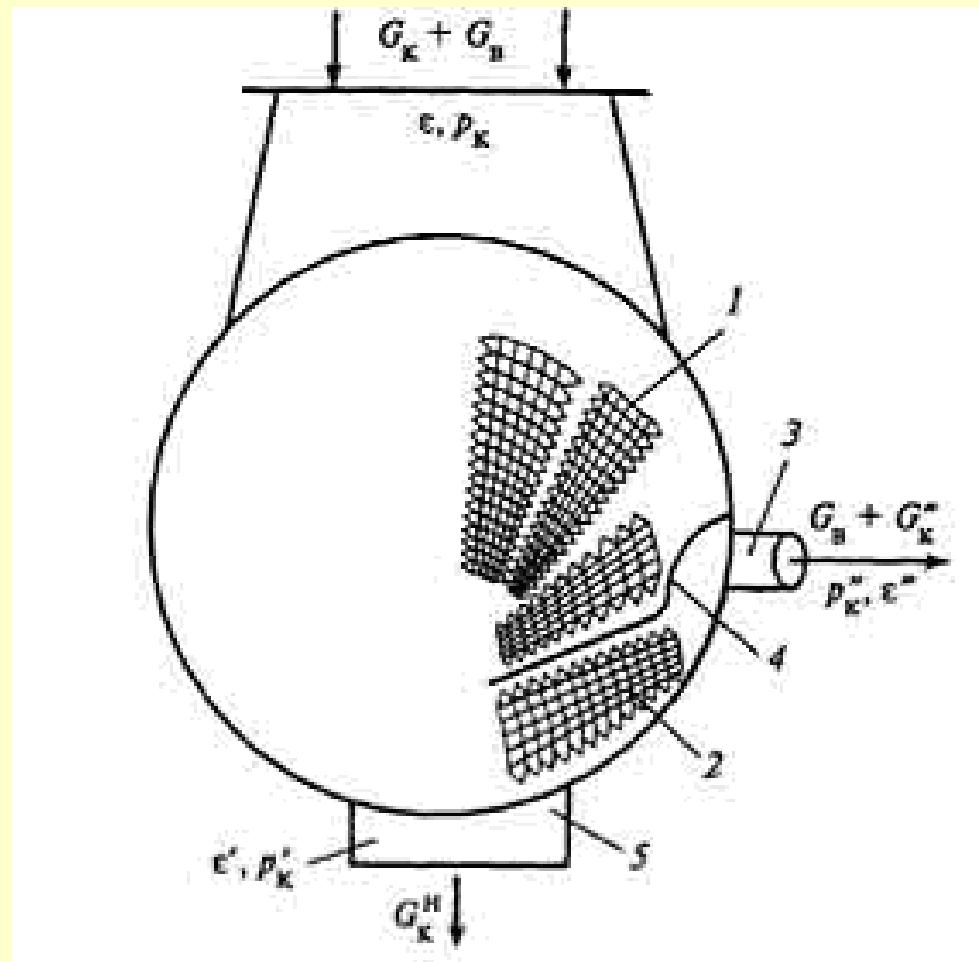
- Переохлаждение способствует насыщению конденсата кислородом



Борьба с переохлаждением конденсата

- Установка воздухоохладителей
- выполнение конденсаторов регенеративного типа

● ● ● | **Схема конденсатора с отдельным удалением конденсата и воздуха**



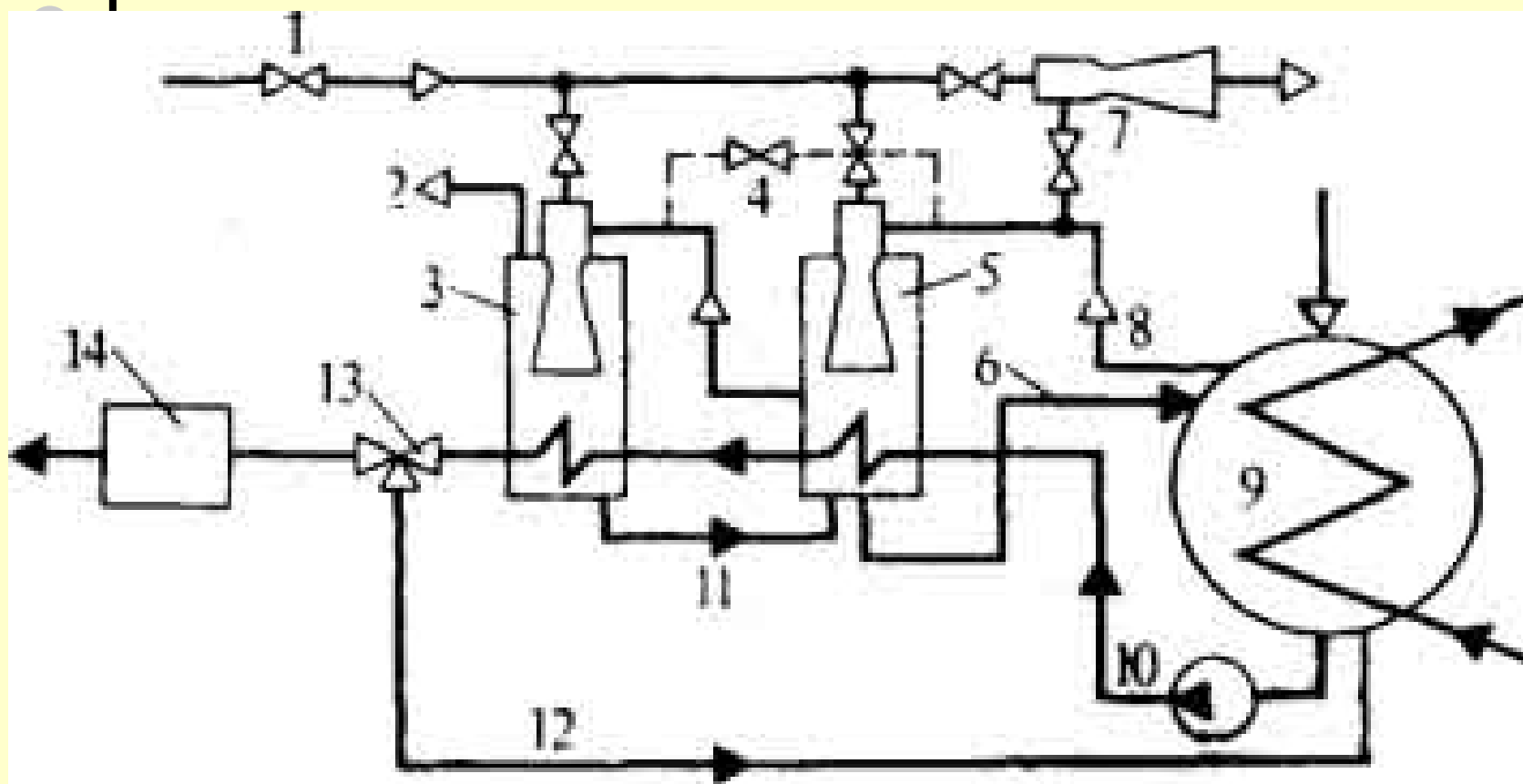


Схема конденсационной установки



Теплота конденсации паровоздушной смеси эжекторов

используется в охладителе эжектора

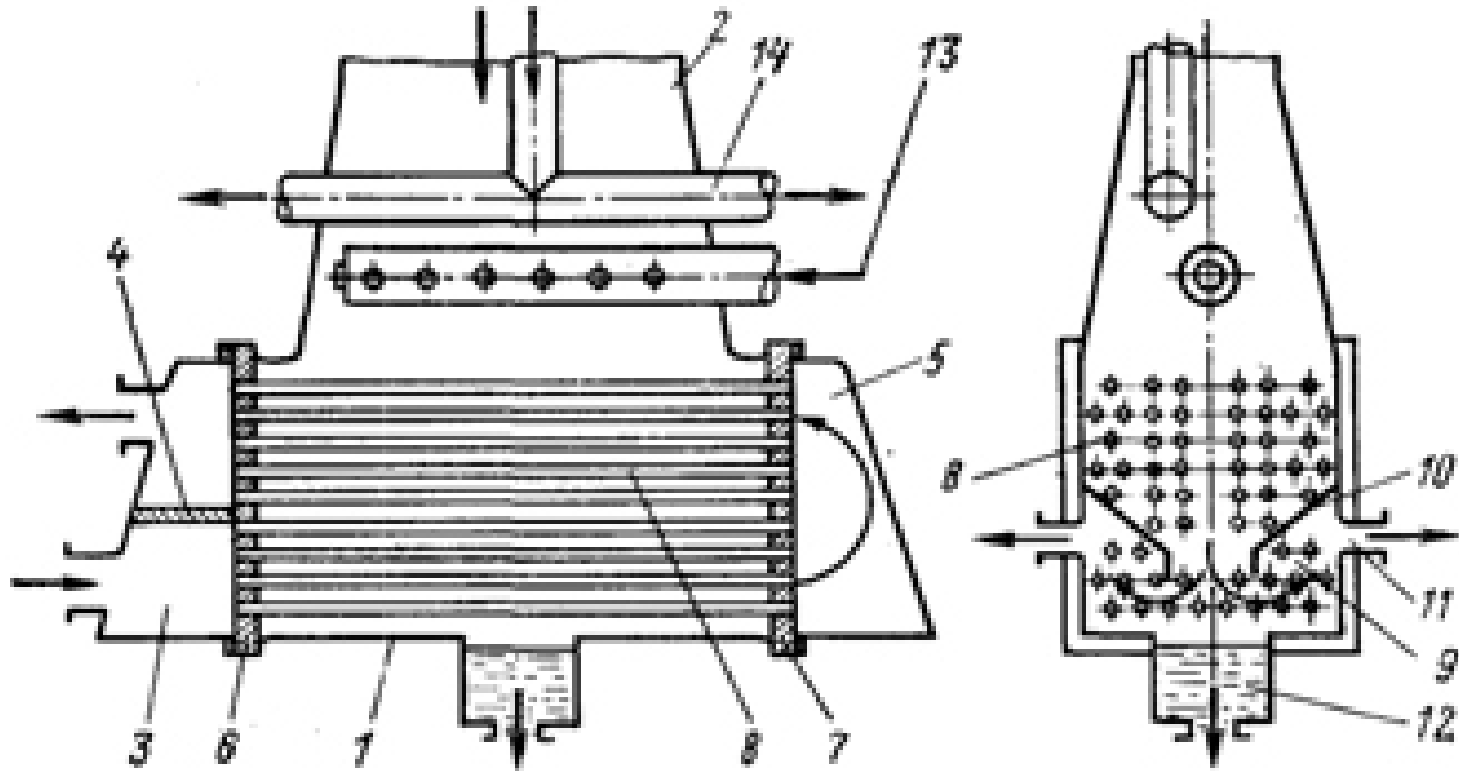


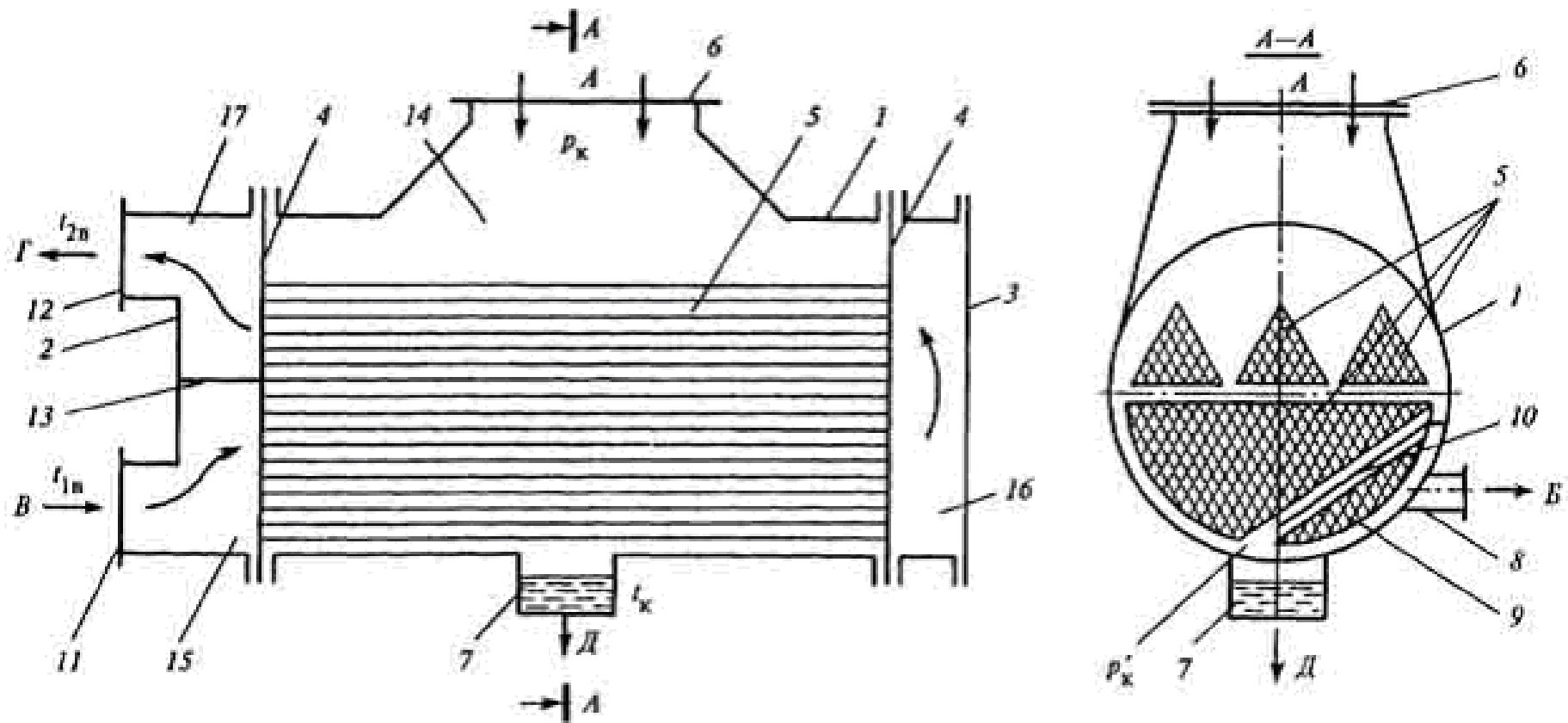
Конструкция конденсатора

- Число конденсаторов определяется числом ЦНД турбины
- обычно каждый ЦНД имеет свой конденсатор
- обычно конденсаторы по воде выполняются **двухходовыми** или **одноходовыми**
- водяные камеры отделяются от парового пространства **трубными досками**



Устройство двухходового конденсатора





Конденсат скапливается в нижней части конденсатора
 - в конденсатосборнике



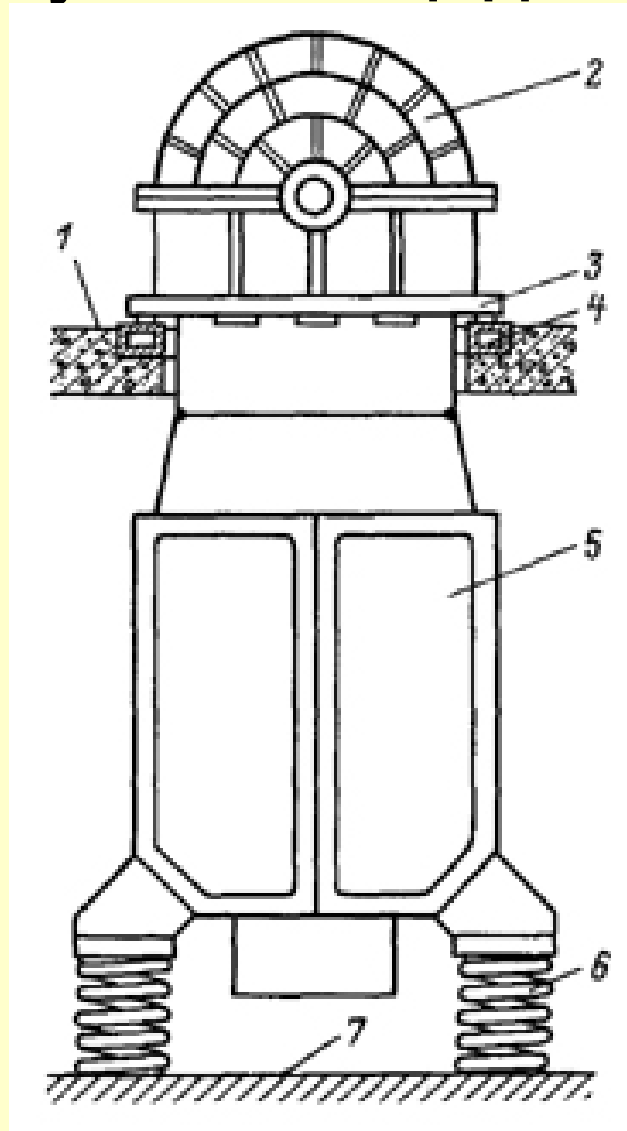
Пружинные опоры конденсатора

Необходимость:

- опасность расцентровки турбины
 - конденсатор жестко связан с выходным патрубком турбины
 - тепловое расширение конденсатора приведет к расцентровке турбины



Схема установки ЦНД и конденсатора





ТРУБНЫЙ ПУЧОК

- совокупность конденсаторных трубок
- наружный диаметр обычно 25 и 28 мм
- толщина 1 мм
- длина - до 9 м более
- Длинные трубки поддерживаются перегородками



Материал

- Латунь (высокий λ)
- медно-никелевый сплав (высокий λ , низкая механическая прочность)
- иногда - титановый сплав
- нержавеющие стали

скорость ВОДЫ

- для латуней 2 - 2,1 м/с
- для сплава МНЖ-5-1: 2,5 - 2,7 м/с



Плотность соединения трубок

- Трубки крепятся в трубных досках вальцовкой
 - Для лучшей плотности:
 - битумная или эпоксидная обмазка
 - сварное соединение стальных трубок с трубными досками
 - двойные трубные доски



Двойные трубные доски

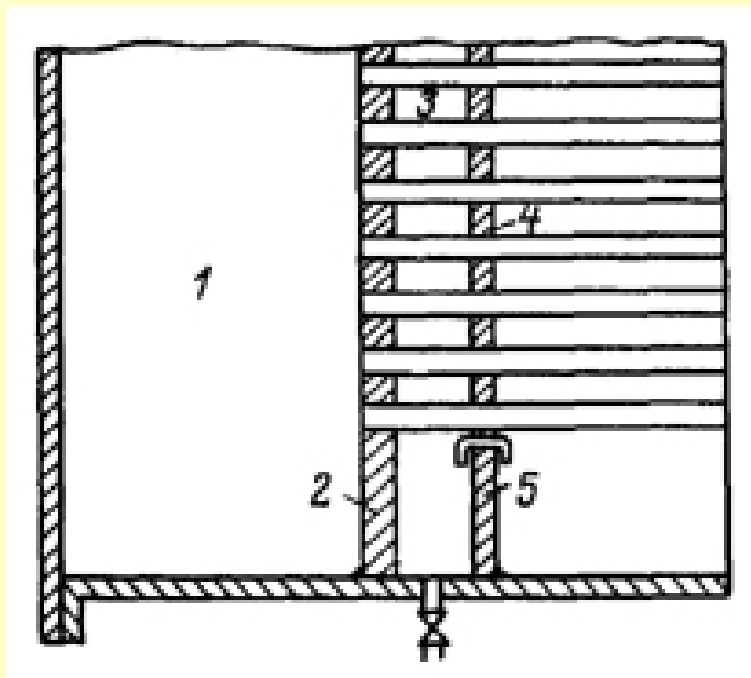
- Назначение: снижение присосов воды
- В пространство между досками подается конденсат с давлением, превышающим давление охлаждающей воды

Недостатки

- сложность изготовления
- сложность ремонта

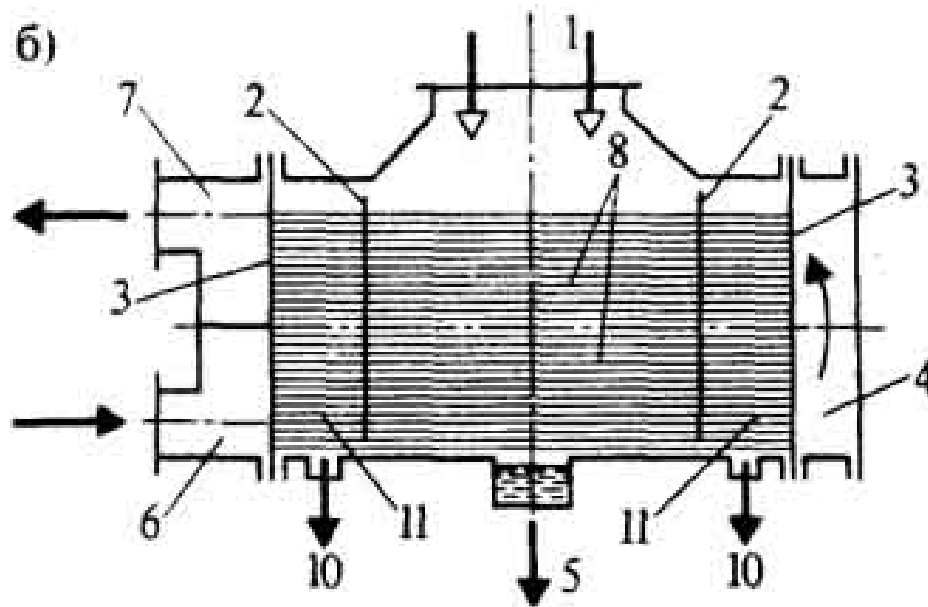
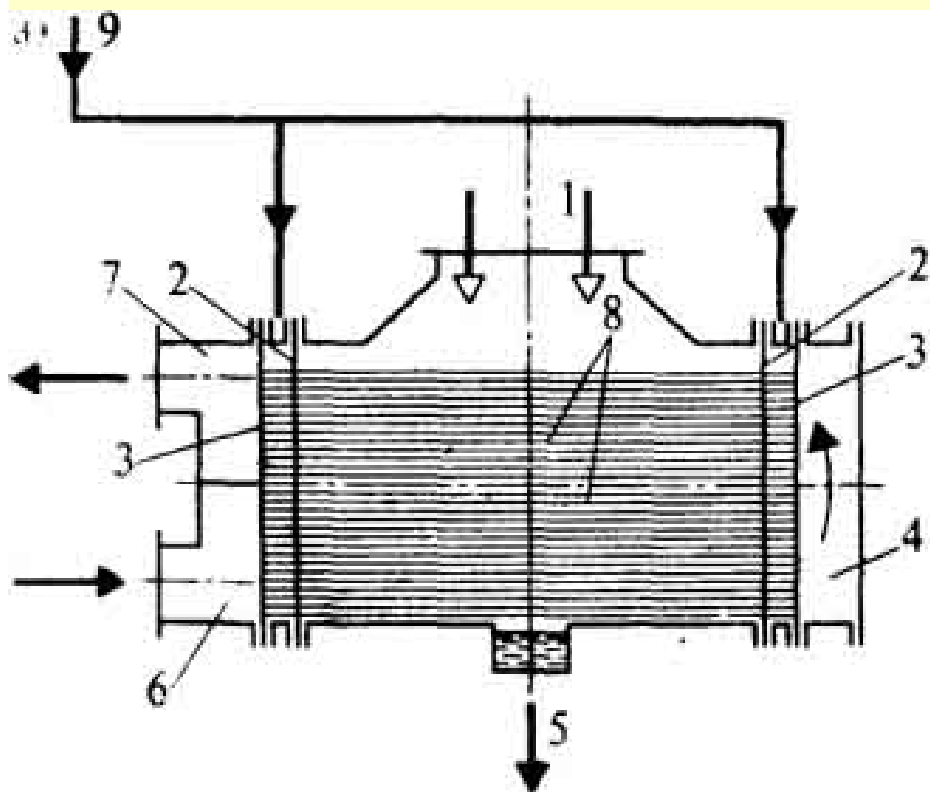


Устройство "соленого" отсека



● ● ●

Схема двухходового поверхностного конденсатора с двойными трубными досками



Функциональная схема включения БОУ для бесприсосного конденсатора

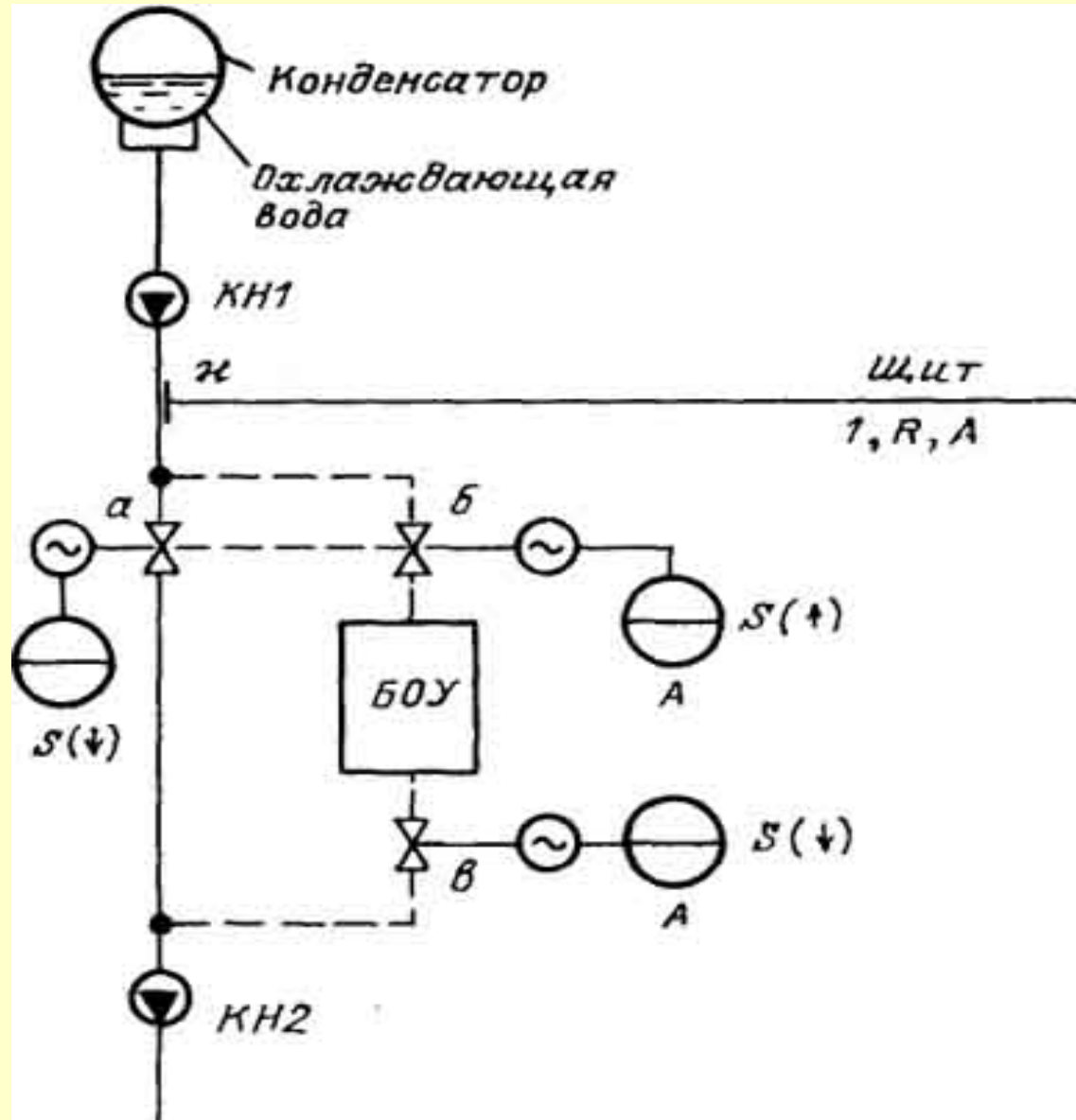
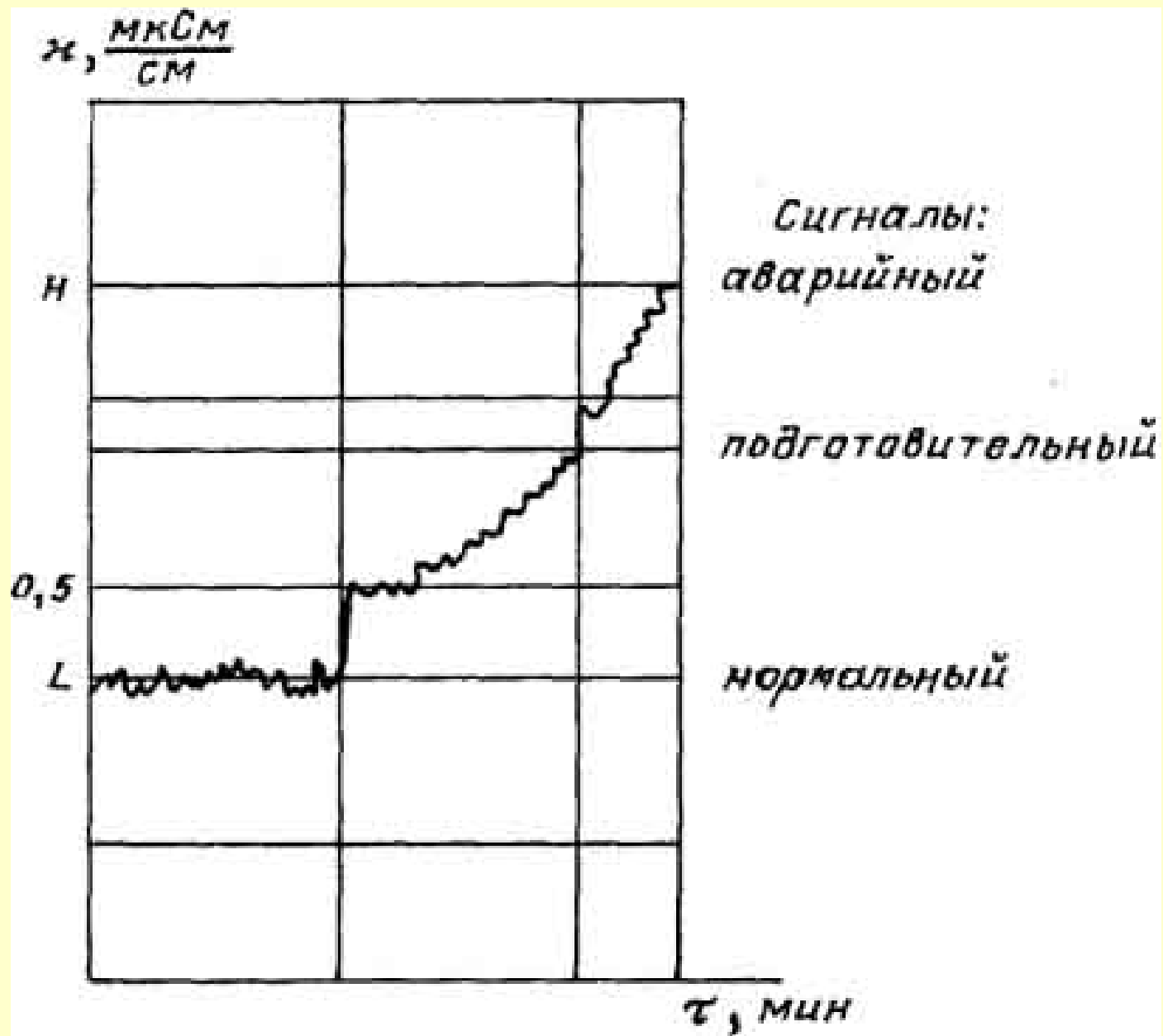


График включения БОУ





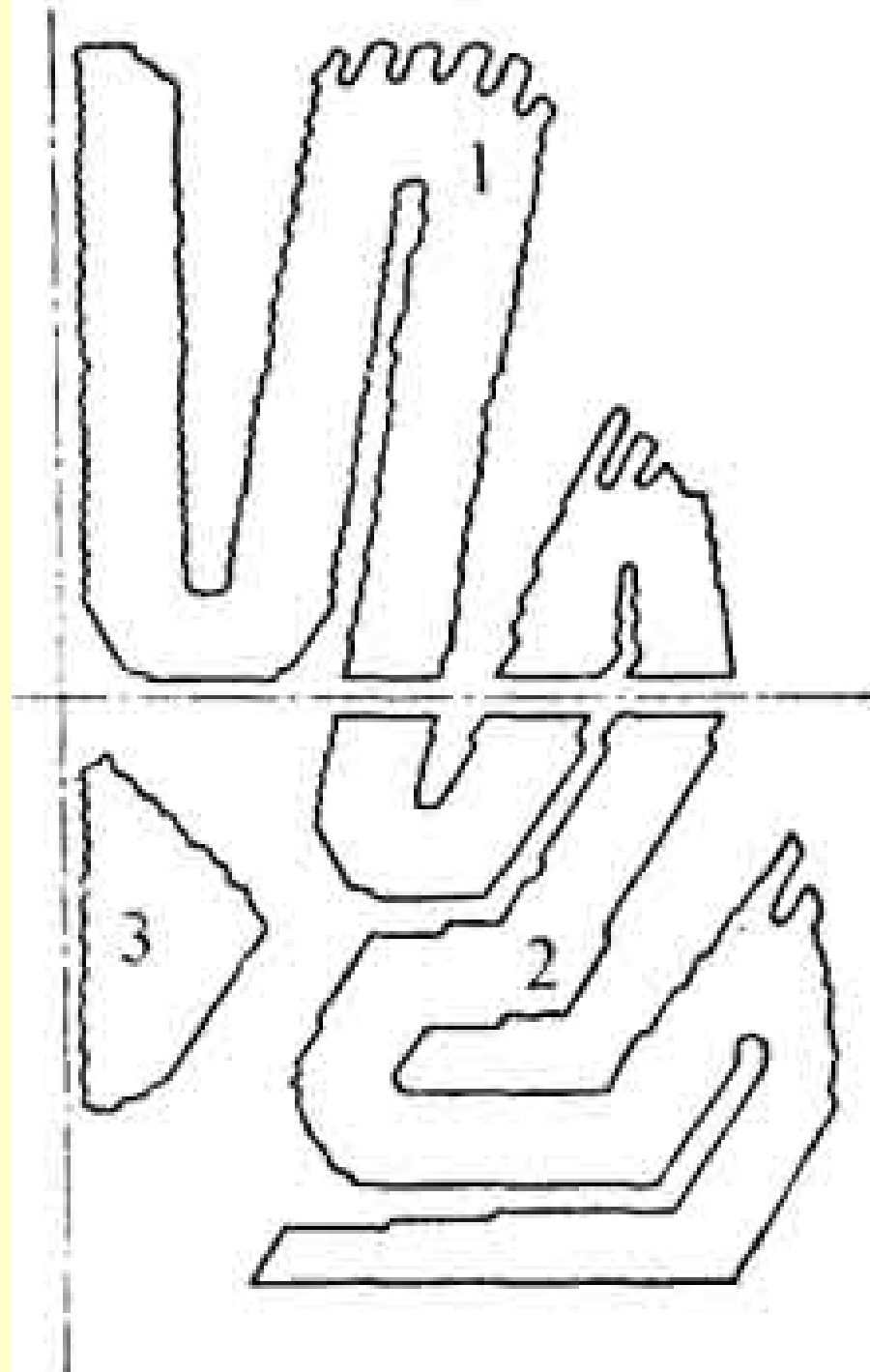
РАЦИОНАЛЬНАЯ КОМПОНОВКА ТРУБНОГО ПУЧКА

Цель:

- снижение температурного напора
- снижение парового сопротивления
- отсос с воздухом минимального количества пара

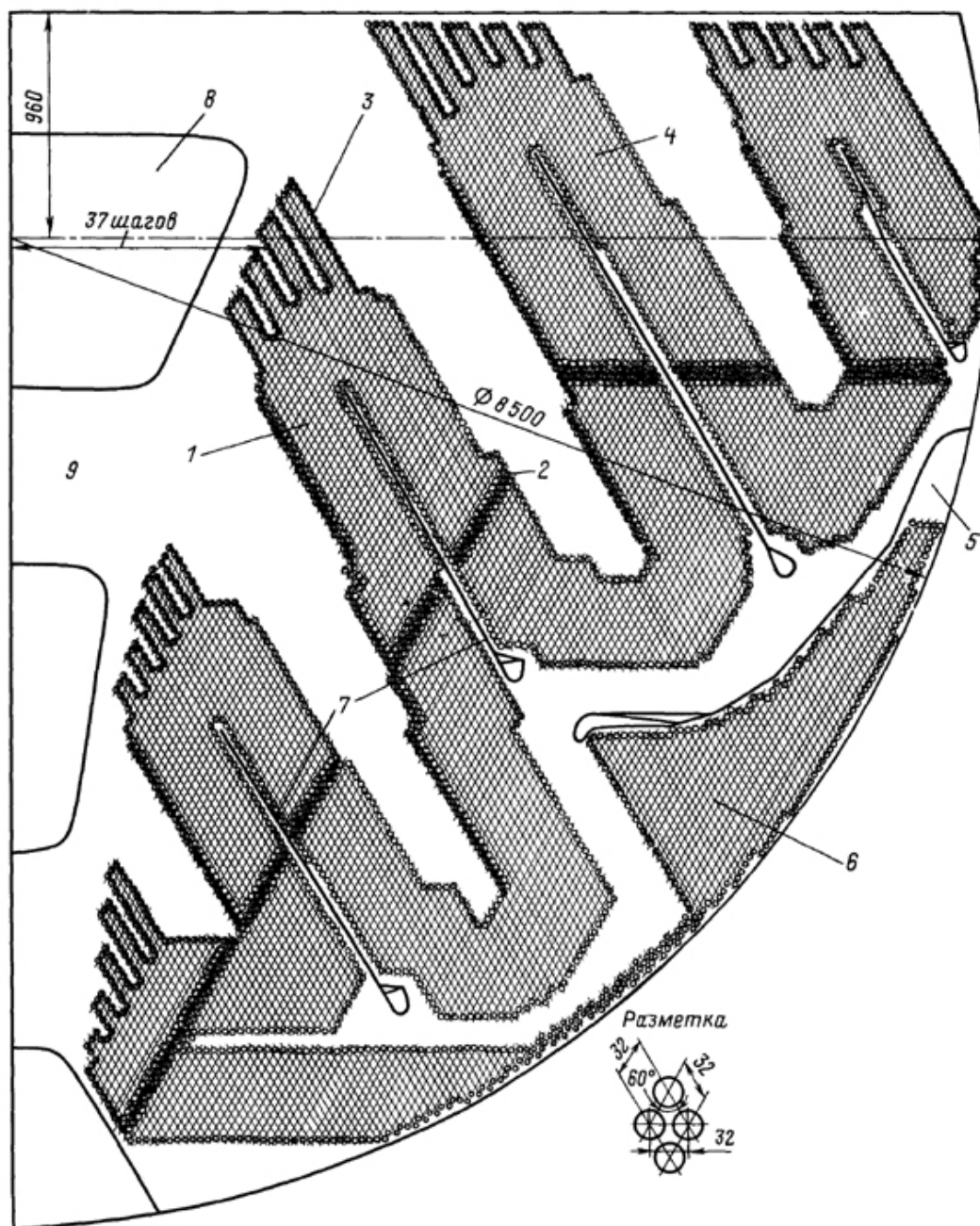
В крупных конденсаторах применяются
компоновки:

- ленточная
- модульная

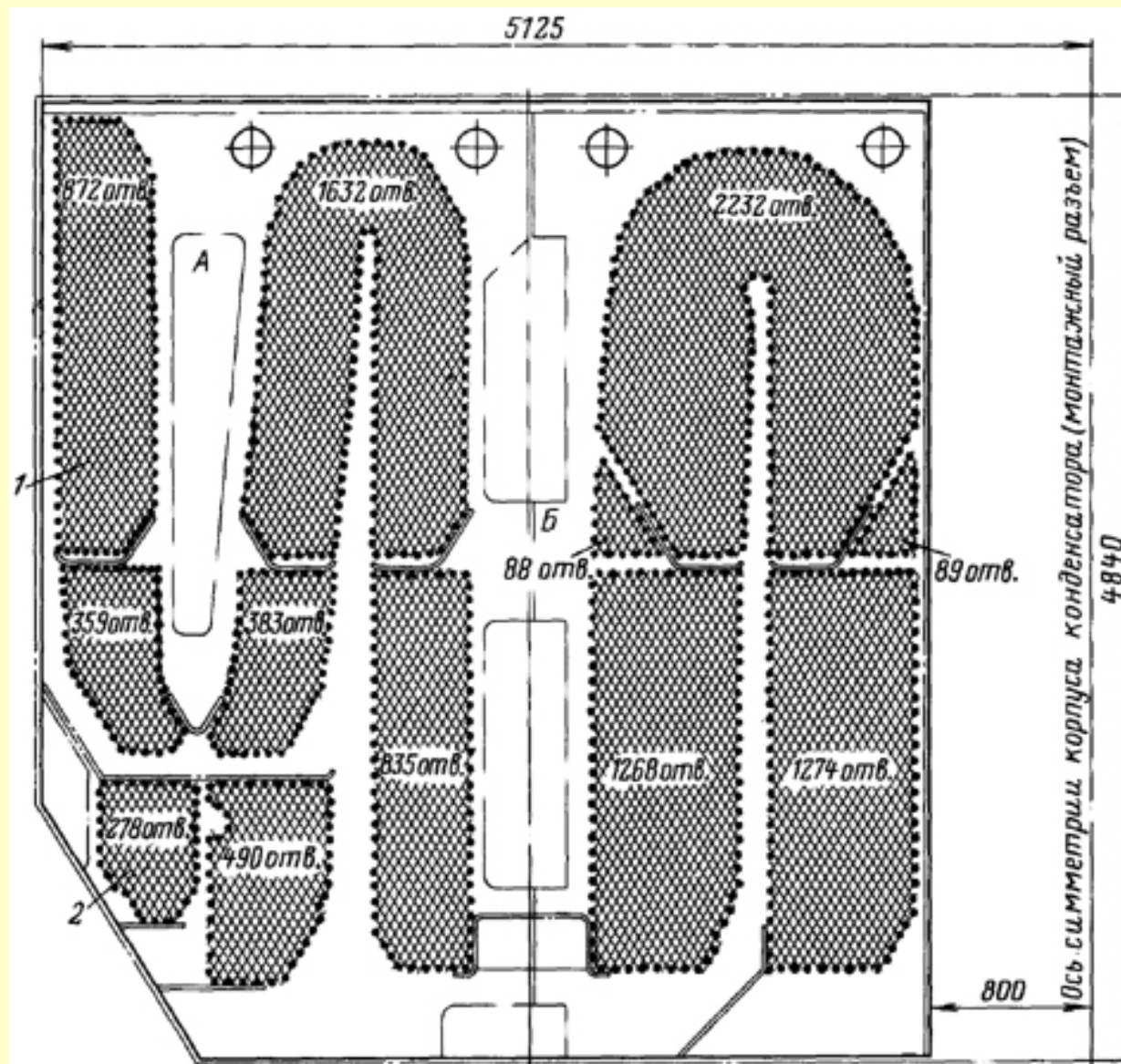


**Ленточная
компоновка
трубного
пучка**

Компоновка трубного пучка конденсатора К-200-130



Трубный пучок конденсатора турбины К-300-240 ЛМЗ





Подача охлаждающей воды в конденсатор двумя параллельными потоками

Цель: без остановки турбины произвести

- осмотр
 - чистку
 - ремонт одной половины трубок
-
- ❑ Конечное давление возрастает
 - ❑ нагрузка турбины снижается



Деаэрация конденсата в конденсаторе

осуществляется за счет:

- непрерывного отсоса воздуха эжектором
- нагрева конденсата в конденсатосборнике до t_s



Необходимость деаэрации

- снижение коррозии конденсатного тракта
- снижение поступления в реактор продуктов коррозии
- удаление радиолитического кислорода и РБГ для АЭС с одноконтурными схемами



Тепловой расчет конденсатора

Задача

- При проектировании - определение поверхности охлаждения конденсатора F_K .

- уравнение теплопередачи

$$Q_K = Fk\Delta t_{cp}$$

- уравнение теплового баланса

$$Q_K = G_K (h_K - h'_K) = W_{ох.в} c_v (t_{в2} - t_{ох.в}),$$



Кратность охлаждения

$$m = W_{\text{ох.в}}/G_{\text{к}}$$

Для конденсаторов турбин АЭС

$$m = 50 \div 100$$

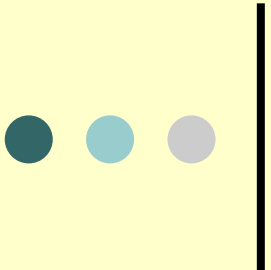


Выбор кратности охлаждения

на основе технико-экономических расчетов

при увеличении m :

- углубление вакуума*
- увеличение расхода охлаждающей воды*
- увеличение мощности ЦН*
- увеличение капитальных вложений в СТВ*



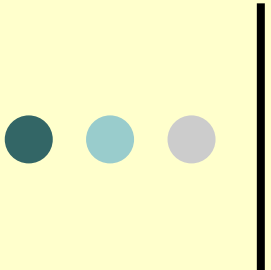
Среднелогарифмический температурный напор

$$\delta t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{в2}} - t_{\text{ох.в}}}{\ln \frac{t_{\text{к}} - t_{\text{ох.в}}}{t_{\text{к}} - t_{\text{в2}}}}$$



Специфические элементы и функции конденсационной установки

- Приемно-сбросные устройства
- Встроенные теплофикационные пучки
- Шариковая очистка конденсатора
- Секционирование конденсаторов
- Деаэрация в конденсатосборнике
- Дожигание водорода



Конденсаторы всех турбин АЭС снабжают приемно-сбросными устройствами

Назначение ПСБУ - снижение давления и температуры пара перед его сбросом в конденсатор

Необходимость :

- излишки пара, возникающие в аварийных режимах
- невозможность подачи пара в турбину из-за его низкой температуры при пуске

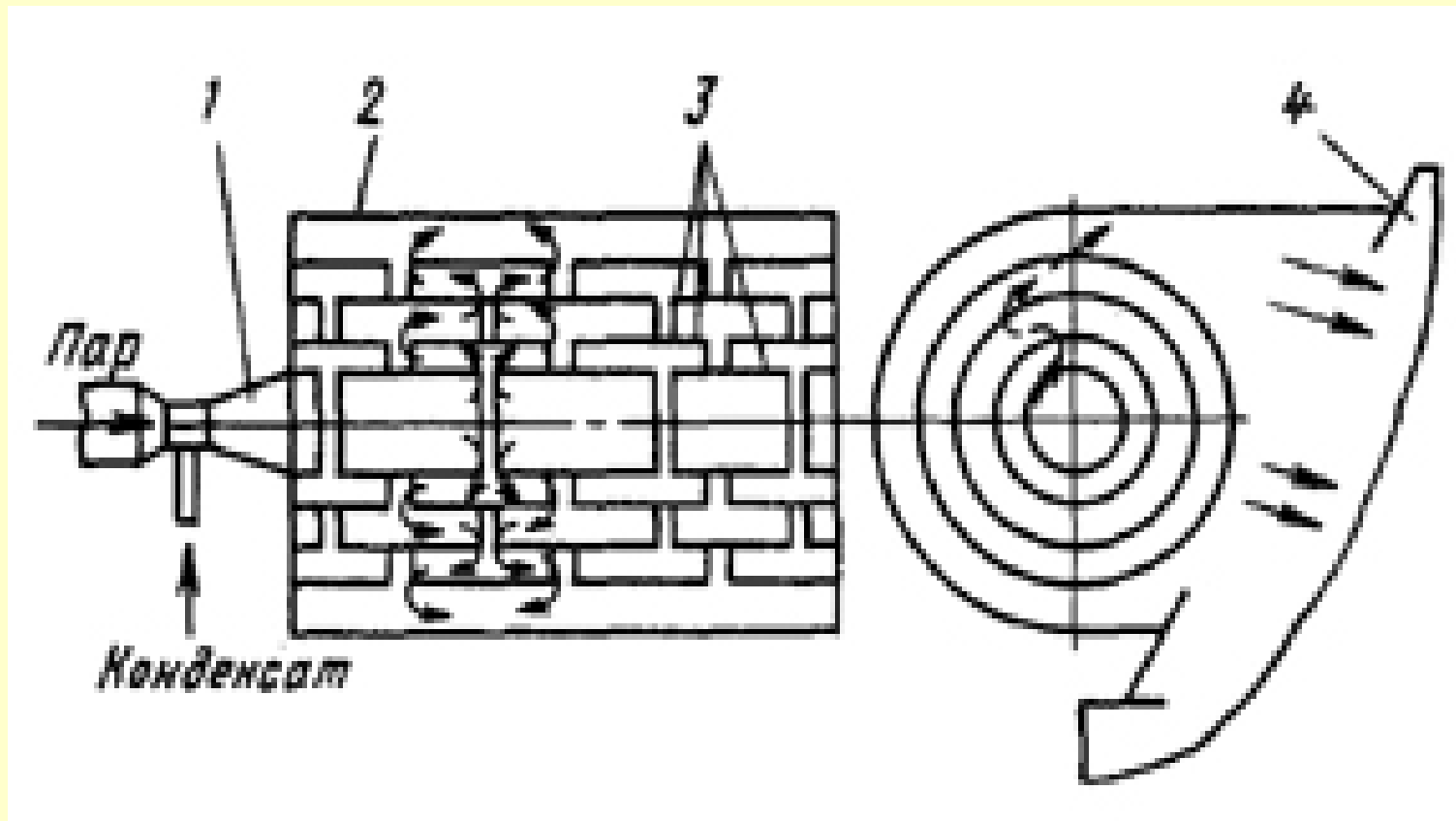


Приемно-сбросное устройство ХТЗ

Увлажнитель - собой сопло Вентури с радиальными отверстиями

Уменьшение давления пара происходит из-за его дросселирования в кольцевых щелях

Схема приемно-сбросного устройства ХТЗ



1 - увлажнитель пара; 2 - корпус устройства; 3 - кольцевые кожухи; 4 - переходной патрубков конденсатора

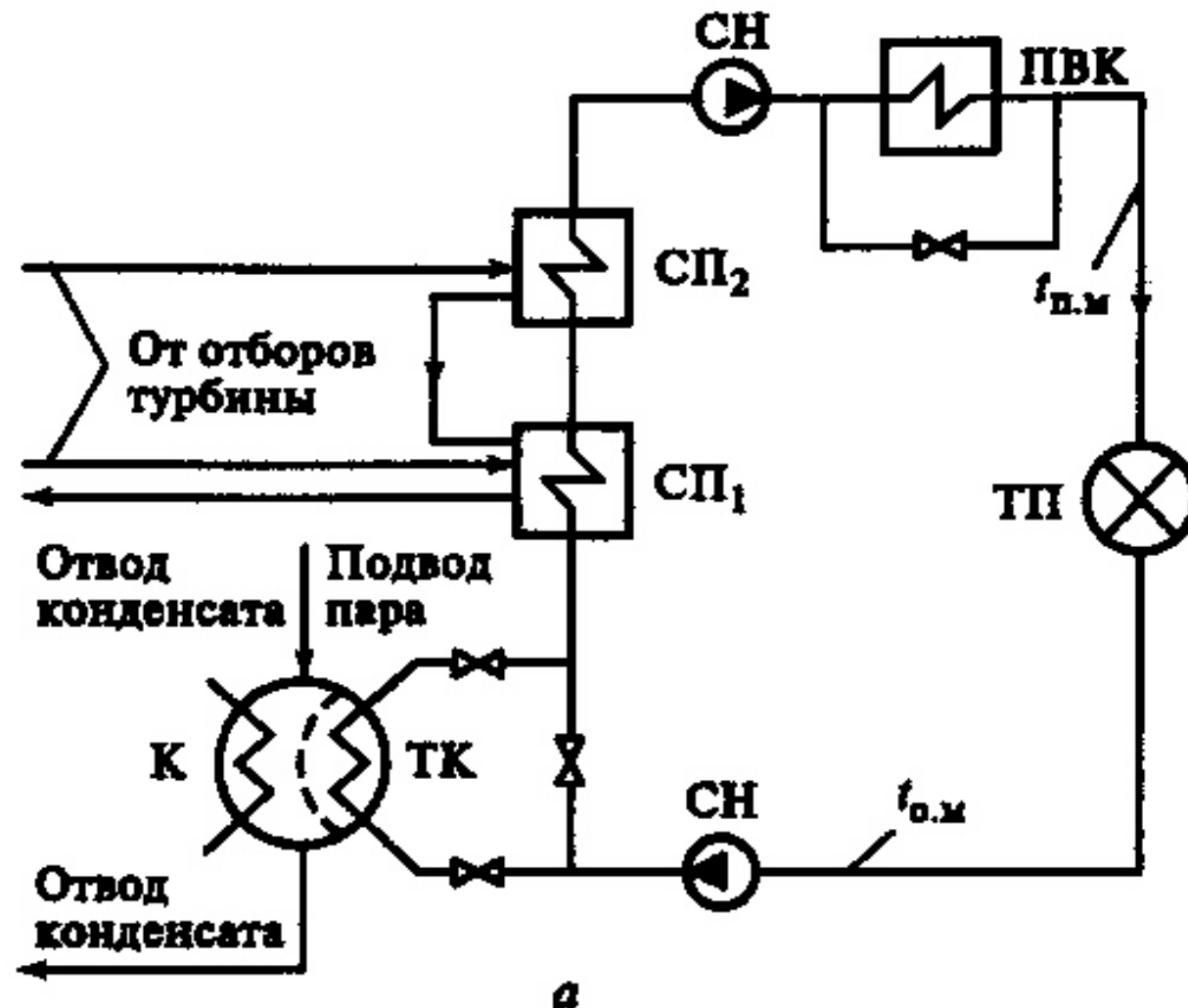


Встроенный теплофикационный пучок

Назначение: подогрев обратной сетевой или подпиточной воды в отопительный период

- часть поверхности нагрева конденсатора у теплофикационных турбин

Принципиальная схема включения
встроенного теплофикационного пучка

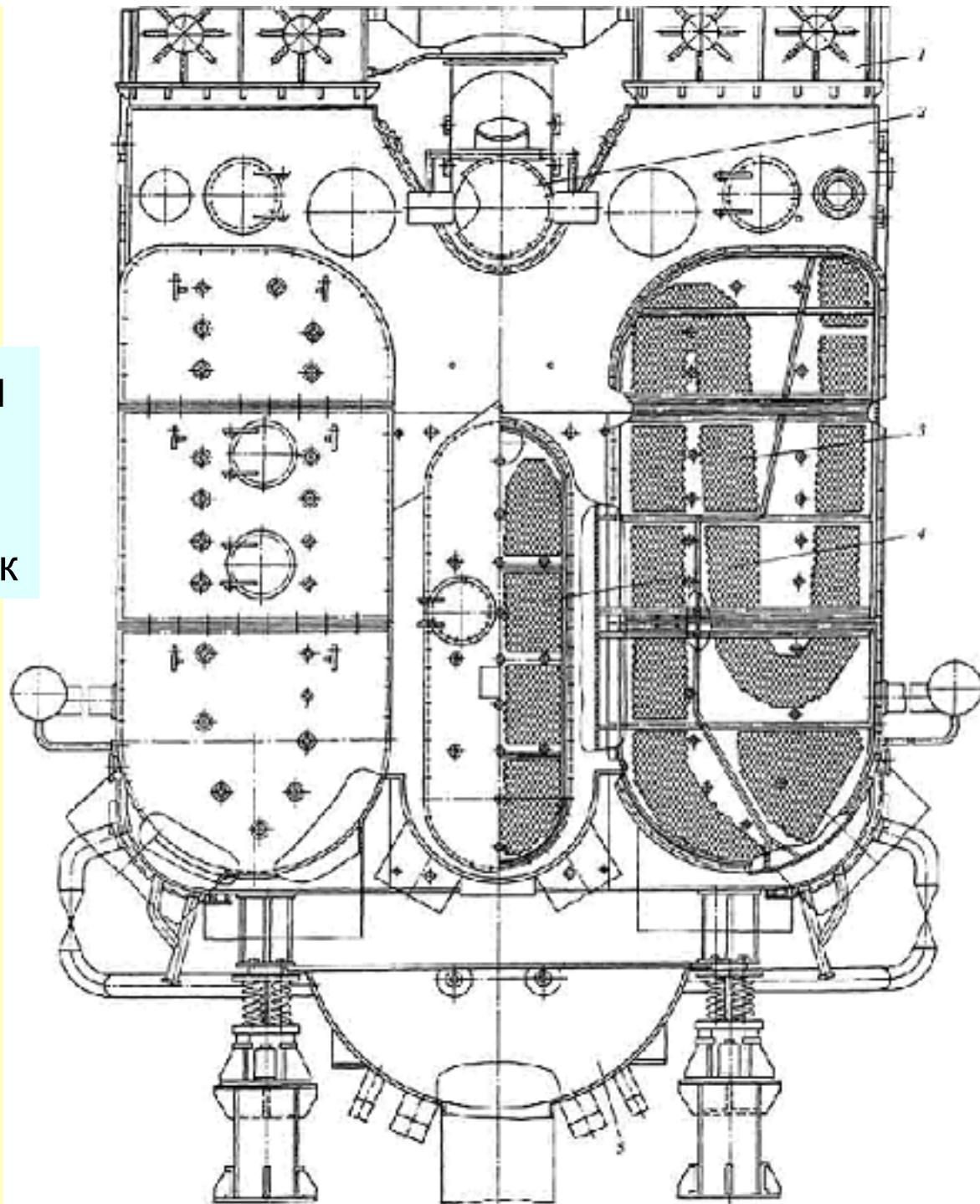




Конденсатор турбины Т-250-240

3- основной пучок

4-теплофикационный пучок

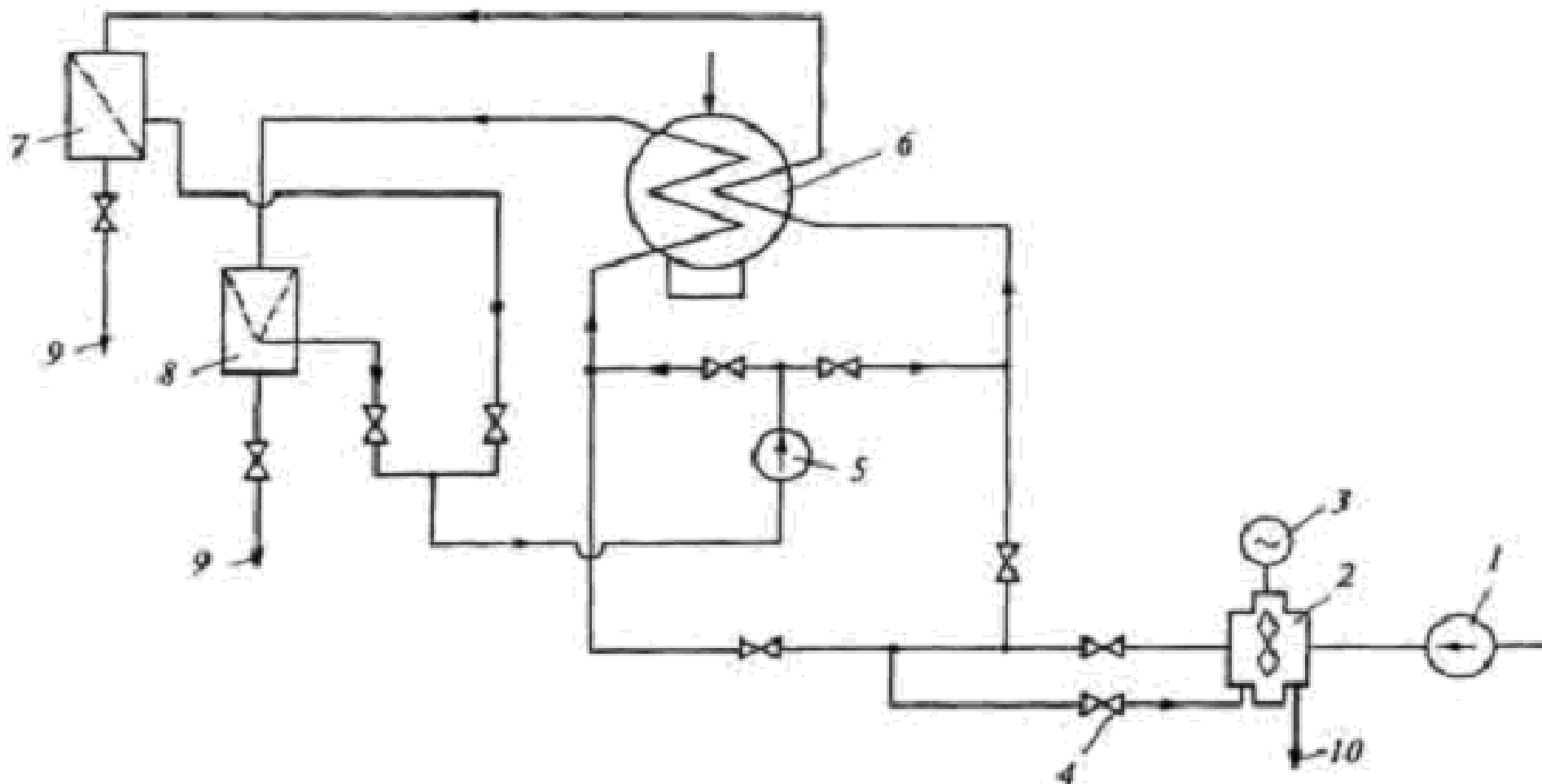




Чистка конденсаторных трубок

- загрязнение внутренней поверхности трубок
- ухудшение условий теплообмена
- ухудшение вакуума

Установка шариковой очистки конденсатора





- Шарики из пористой резины диаметром на 1-2 мм больше внутреннего диаметра трубок



Положительные моменты, связанные с шариковой очисткой конденсатора

- Повышение коэффициента теплопередачи ($q_{\text{ту}}$ снижается на 1-2%)
- Исключение механических чисток трубок
- Исключение химических промывок, приводящих к экологическим проблемам



Секционирование конденсаторов

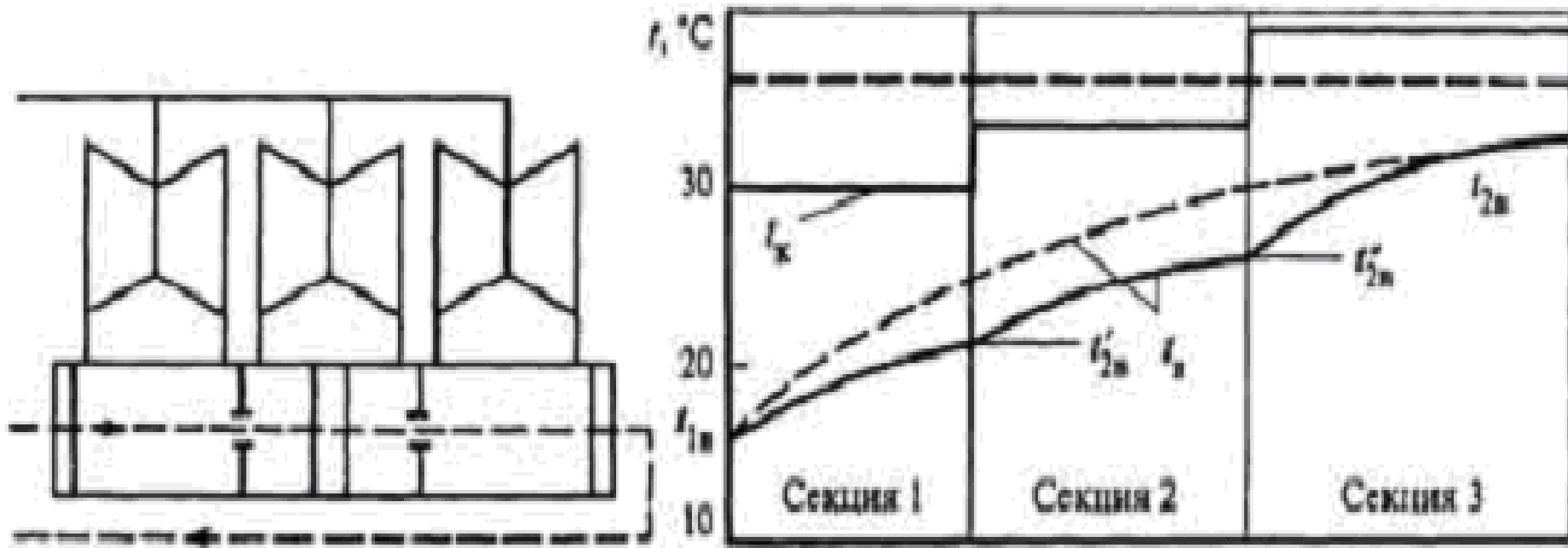


Схема трехсекционного конденсатора и изменение температуры в нем

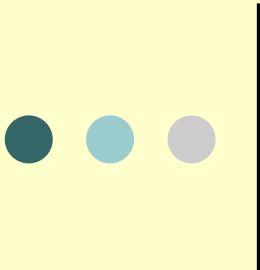


Смысл секционирования

- ❑ в первых двух секциях условия охлаждения пара лучше, чем в односекционной конструкции
- ❑ в третьей секции хуже

Мощность первых ЦНД выше, чем у третьего ЦНД

Результирующий эффект оказывается положительным



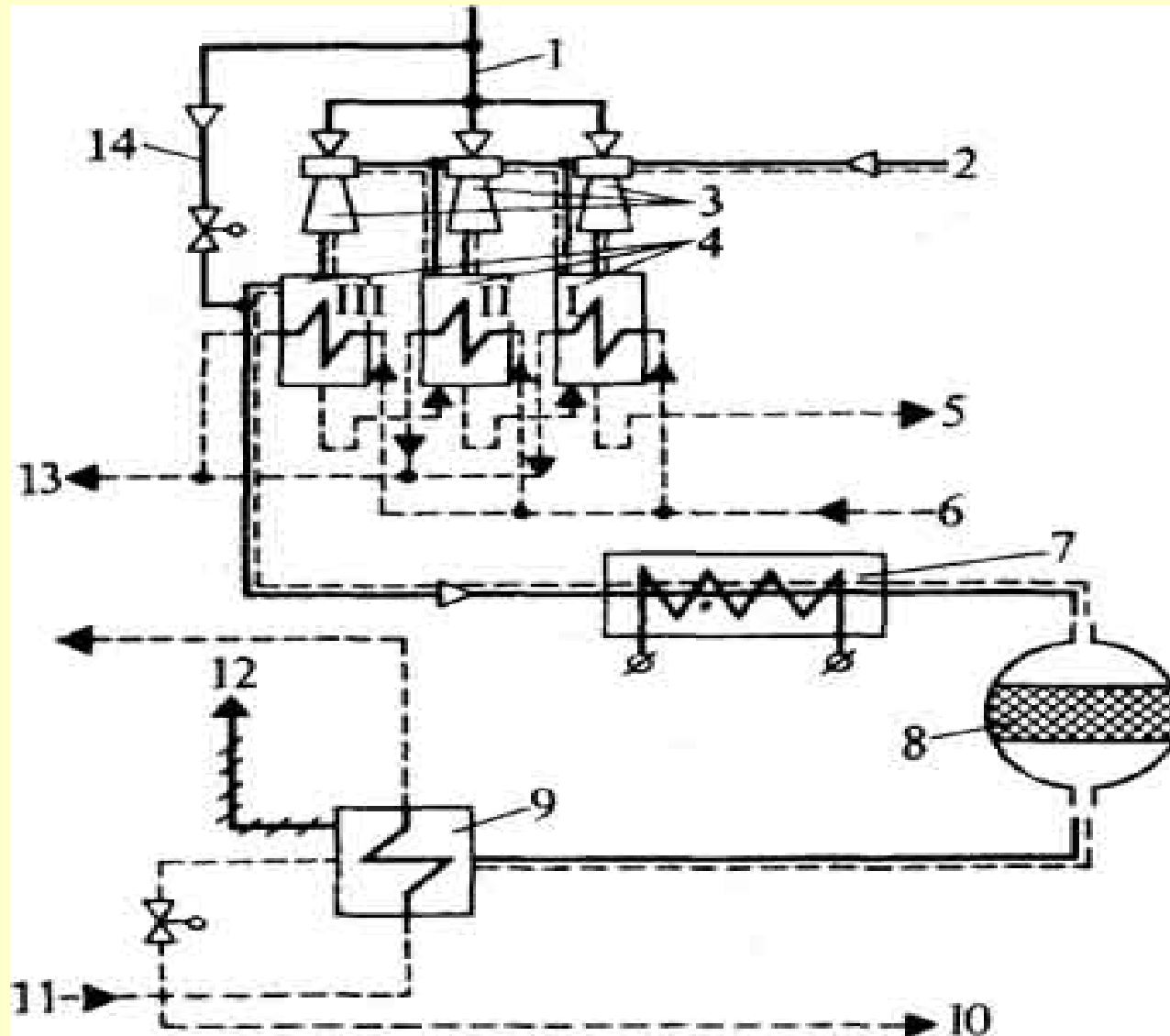
Основные данные по конденсаторам турбин насыщенного пара

Тип турбины	Тип конденсатора	Поверхность теплообмена, м ²	Расход пара в конденсатор, т/ч	Число конденсаторов на одну турбину, шт.	Расчетная температура охлаждающей воды, °С	Расчетный вакуум, кПа
К-220-44	К-12150	12 150	365	2	22	5,1
К-500-65/3000	К-10120	10 120	435	4	12	3,6
К-750-65/3000	К-16100	16 100	600	4	15	4,4
К-1000-60/1500	К-45600	45 600	1725	2	15	3,9
К-1000-60/3000	КЦ-1000	22 000	765	4	20	4,9



Дожигание водорода

Схема установки для дожигания водорода





Принципиальная схема эжектора



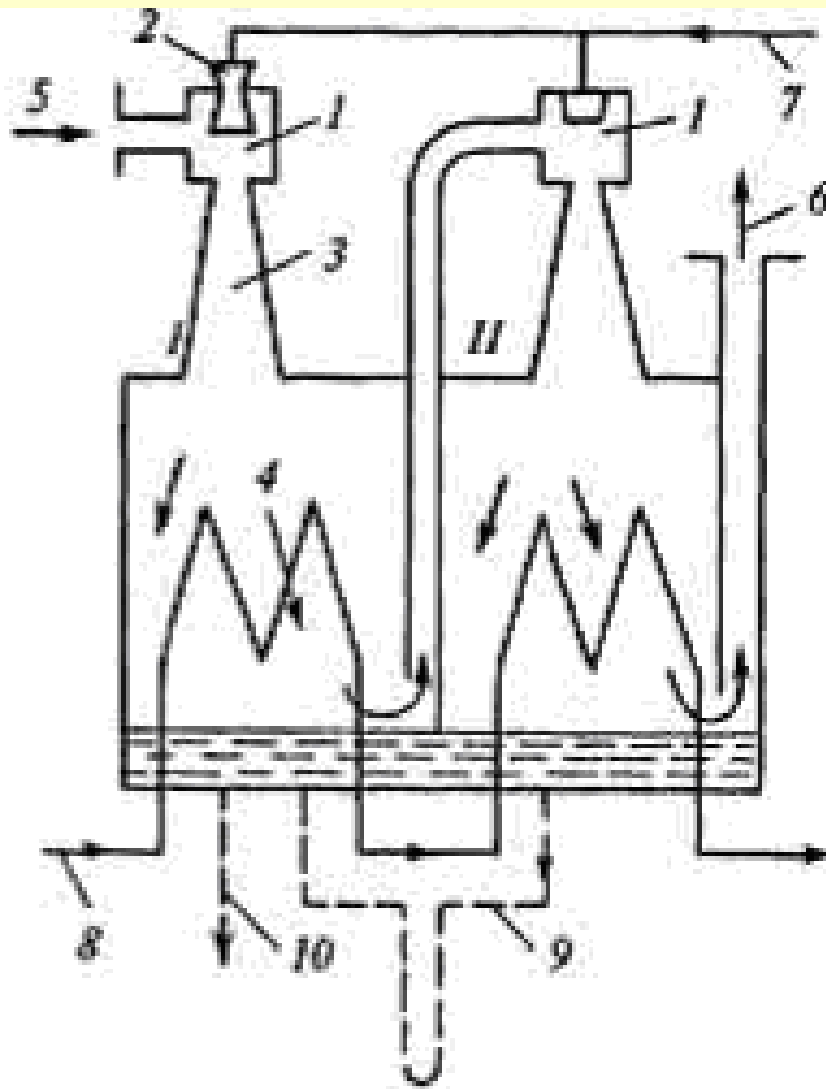


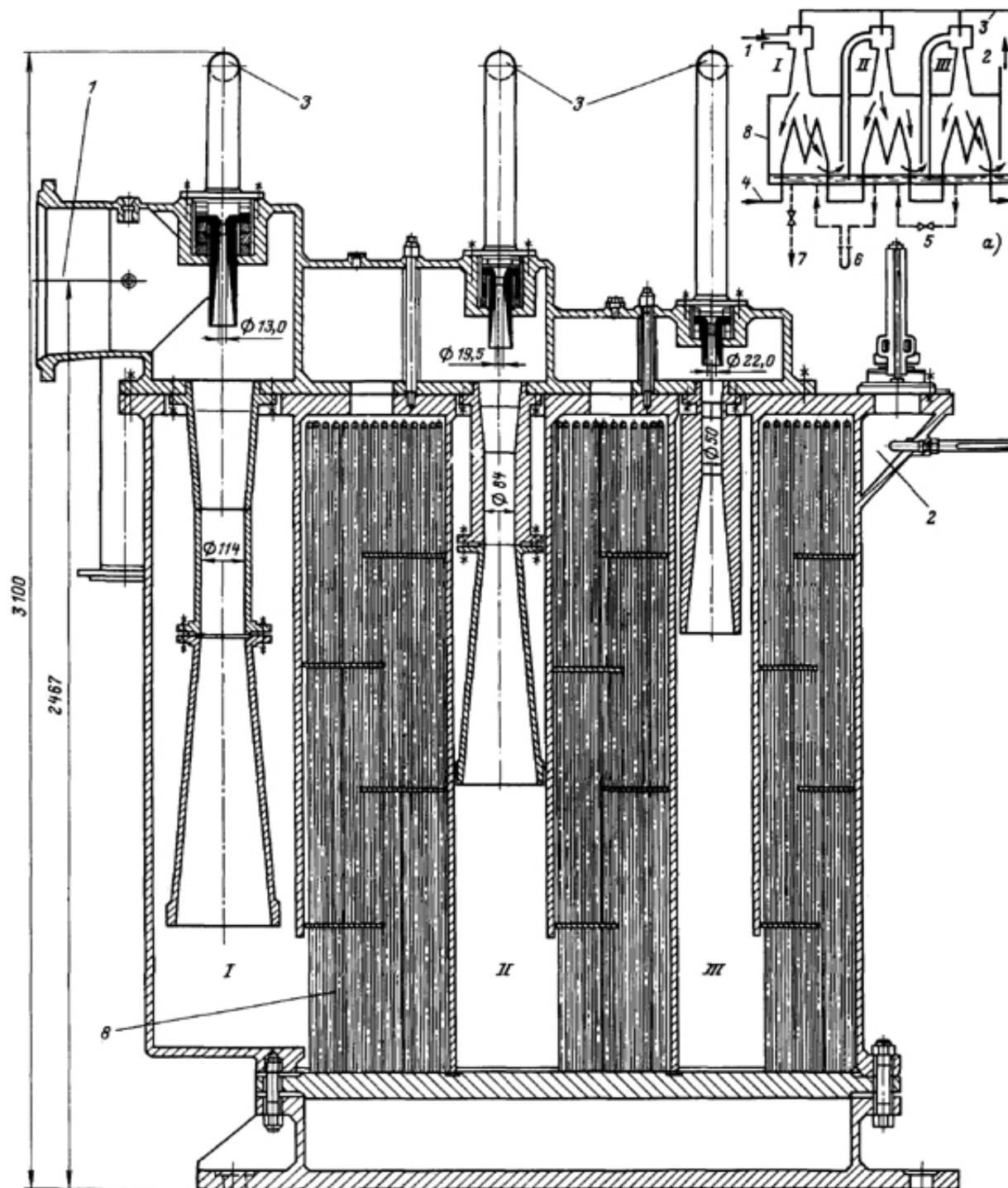
Одноступенчатый эжектор

- Одноступенчатый - разрежение 0,073 – 0,08 МПа
- Применяется в качестве пускового
- Двух и трехступенчатые эжекторы создают более глубокое разрежение

● ● ● |

Принципиальная схема двухступенчатого пароструйного эжектора





Трехступенчатый
пароструйный
эжектора



Водоструйные эжекторы

Рабочее тело – вода из напорного циркуляционного водовода

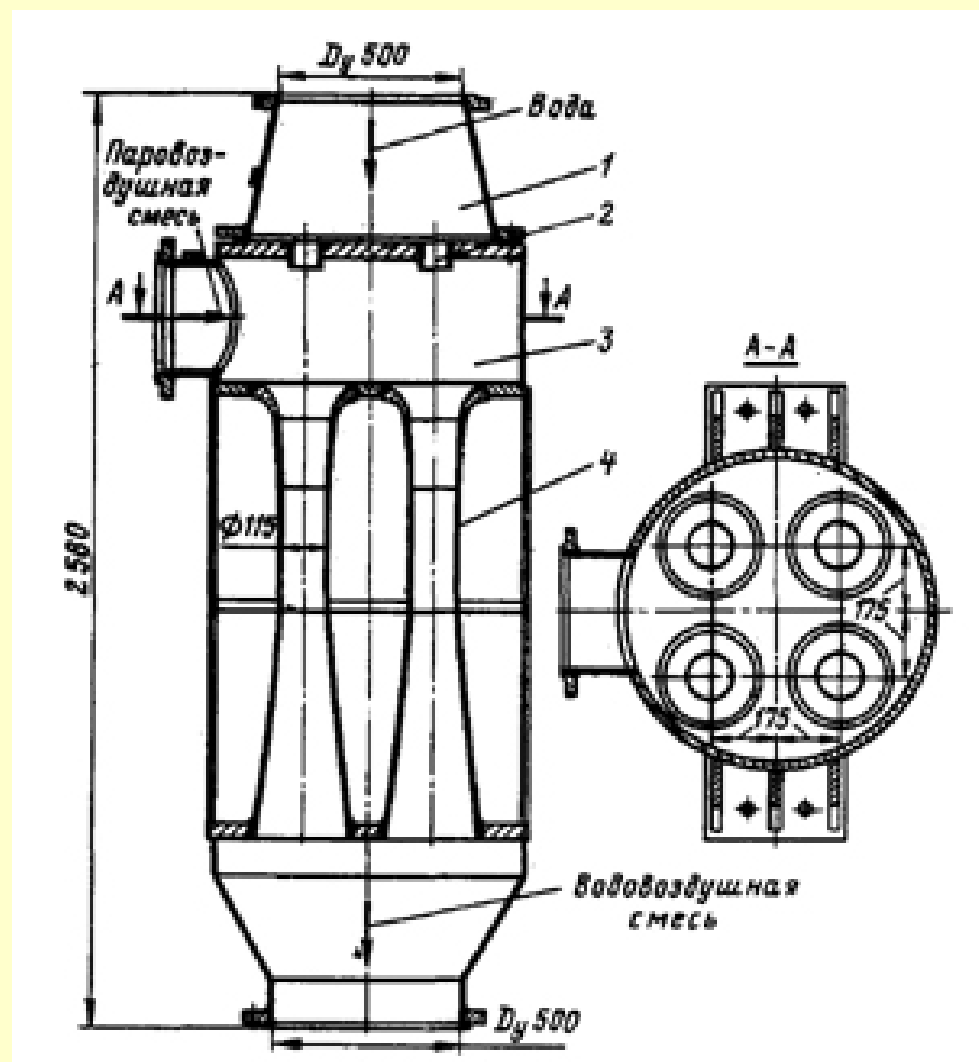
Достоинство:

- более глубокий вакуум

Недостаток:

- отсасываемый пар и его теплота теряются

Водоструйный эжектор ЭВ-4-1400 ЛМЗ



Эжектор уплотнений

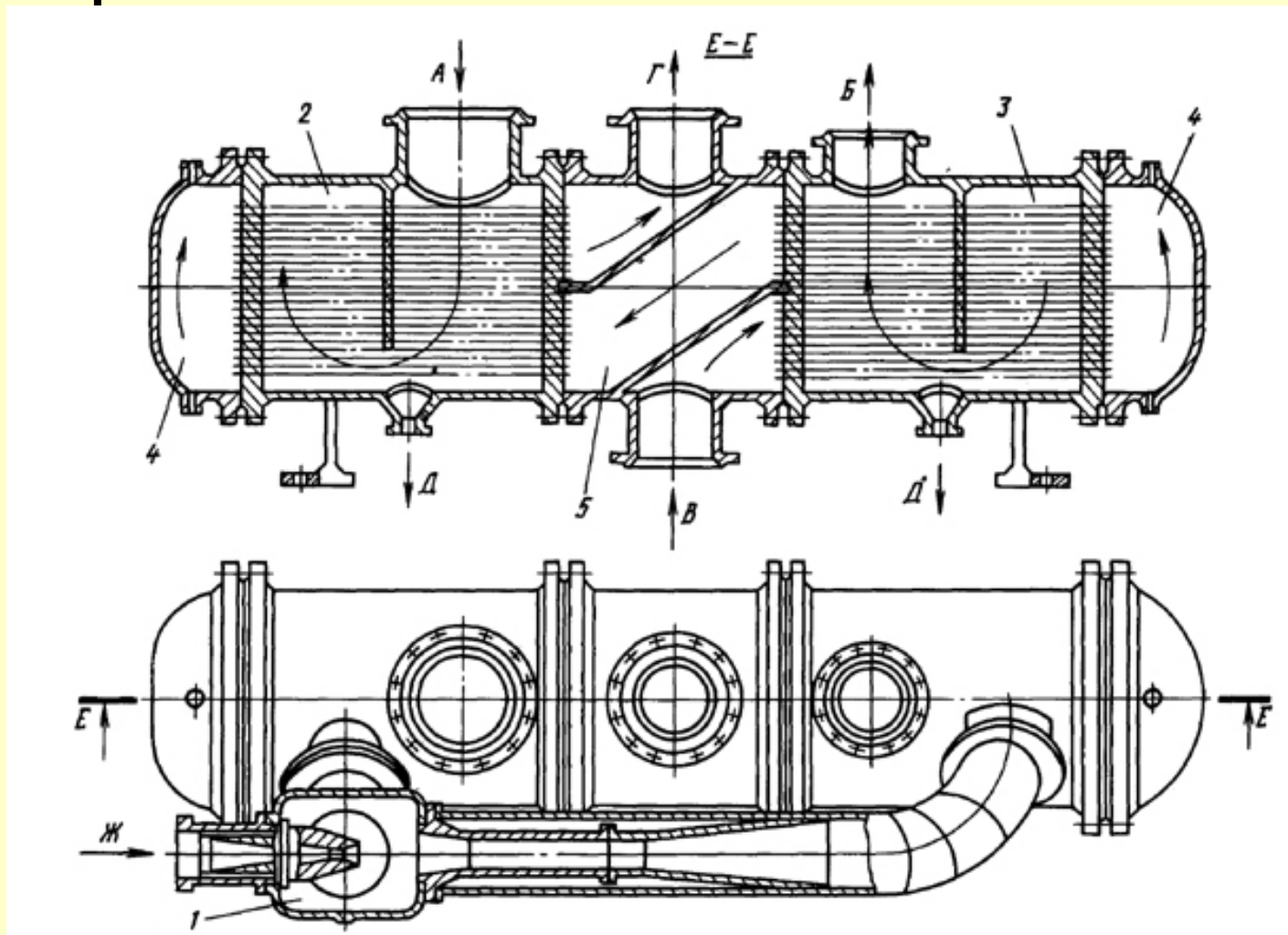




Схема включения конденсатных насосов

