



# АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Тема 10. Система сепарации и промежуточного перегрева



## Основные вопросы:

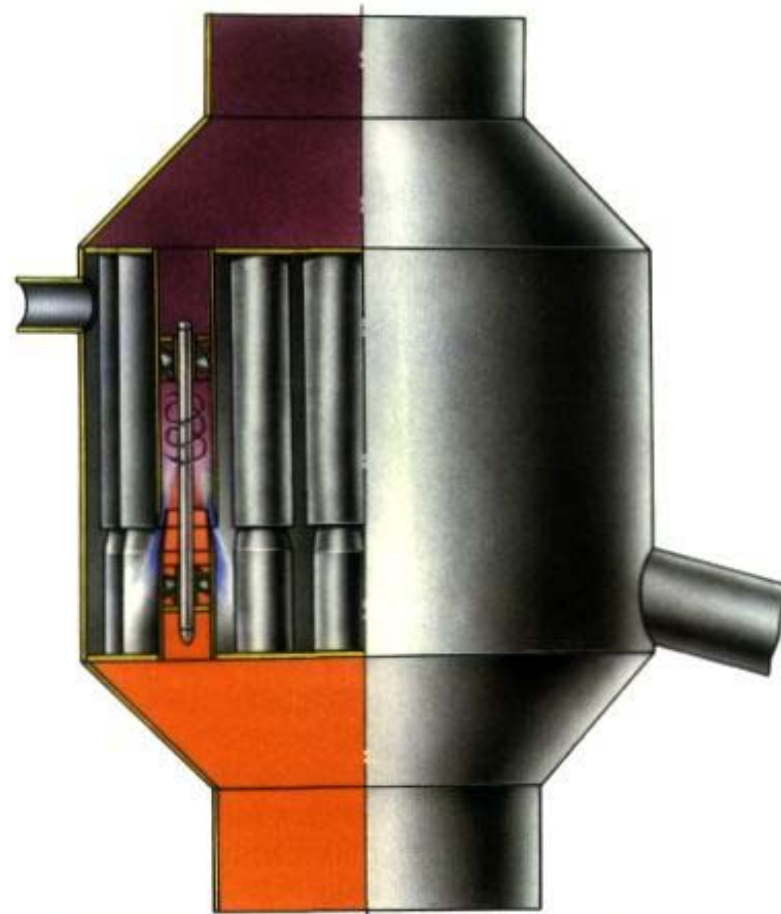
- ✦ Промежуточная сепарация пара
- ✦ Промежуточный перегрев пара на АЭС



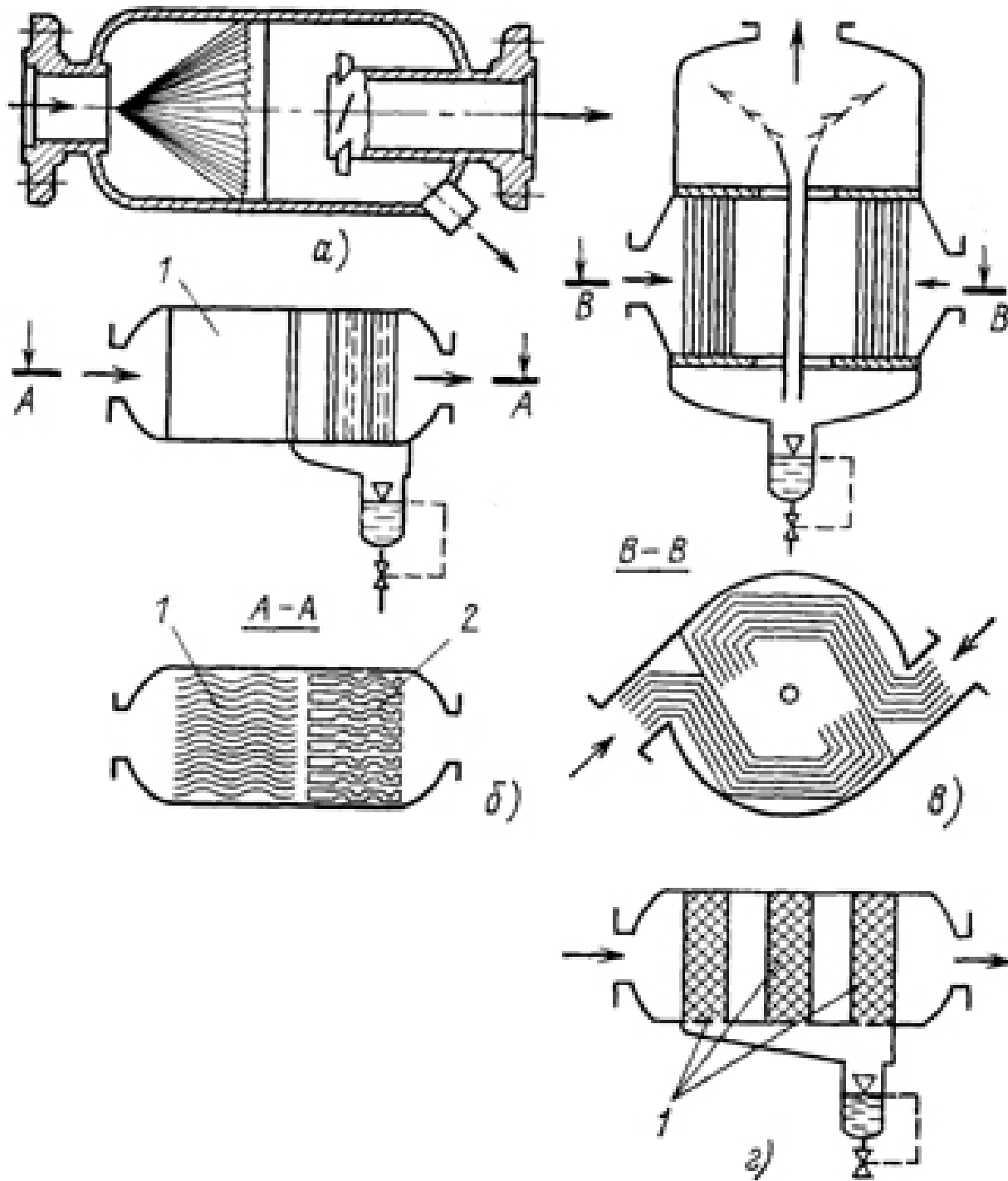
# Принципиальные конструктивные схемы сепараторов

- ✦ вихревые (центробежные)
- ✦ сетчатые
- ✦ жалюзийные (шевронные, рифленые)

Центробежные сепараторы для  
турбоустановок энергоблока АЭС  
Centrifugal separators for turbine  
units of nuclear power plants



24.12.2009



## Схемы сепараторов





## Достоинства шевронных сепараторов

- ✦ Простота конструкции
- ✦ высокая степень надежности при различных режимах работы

## Коэффициент сепарации

$$\eta_{\text{сеп}} = \frac{y_0 - y_1}{y_0(1 - y_1)}$$

где  $y_0, y_1$  - влажность на входе и выходе из сепаратора

## Увеличение влажности $u_1$ за сепаратором на 1 % приводит к

- ☛ снижению КПД турбоустановки

$$\Delta\eta/\eta_0 = 0,3 \div 0,4 \%$$

- ☛ опасности аварий лопаток и роторов  
(при установке С без ПП)

- ☛ ухудшению работы ПП и  
термодинамическому проигрышу (при  
наличии ПП)



В большинстве используемых в турбинах сепараторов

✚  $y_1 = 0,005 \div 0,010$

✚  $\eta_{\text{сеп}} = 0,91 \div 0,97$  (при  $y_0 = 0,10 \div 0,15$ )

По результатам испытаний

$$\eta_{\text{сеп}} = 0,98 \div 0,99$$

## Роль гидравлического сопротивления сепаратора

☛ Увеличение потерь давления пара в С на

$$\Delta p / p_{\text{разд}} = 1 \%$$

ведет к снижению экономичности турбоустановки

на  $\Delta \eta / \eta_{\text{э}} = 0,1 \div 0,15 \%$

## Конструктивные требования к сепаратору

- ✿ умеренные размеры и масса
- ✿ равномерное поле скоростей пара
- ✿ высокая эффективность сепарации
- ✿ небольшое гидравлическое сопротивление
- ✿ оптимальные конфигурации и размеры жалюзийных каналов
  - плавность канала
  - большое число поворотов потока примерно под прямым углом

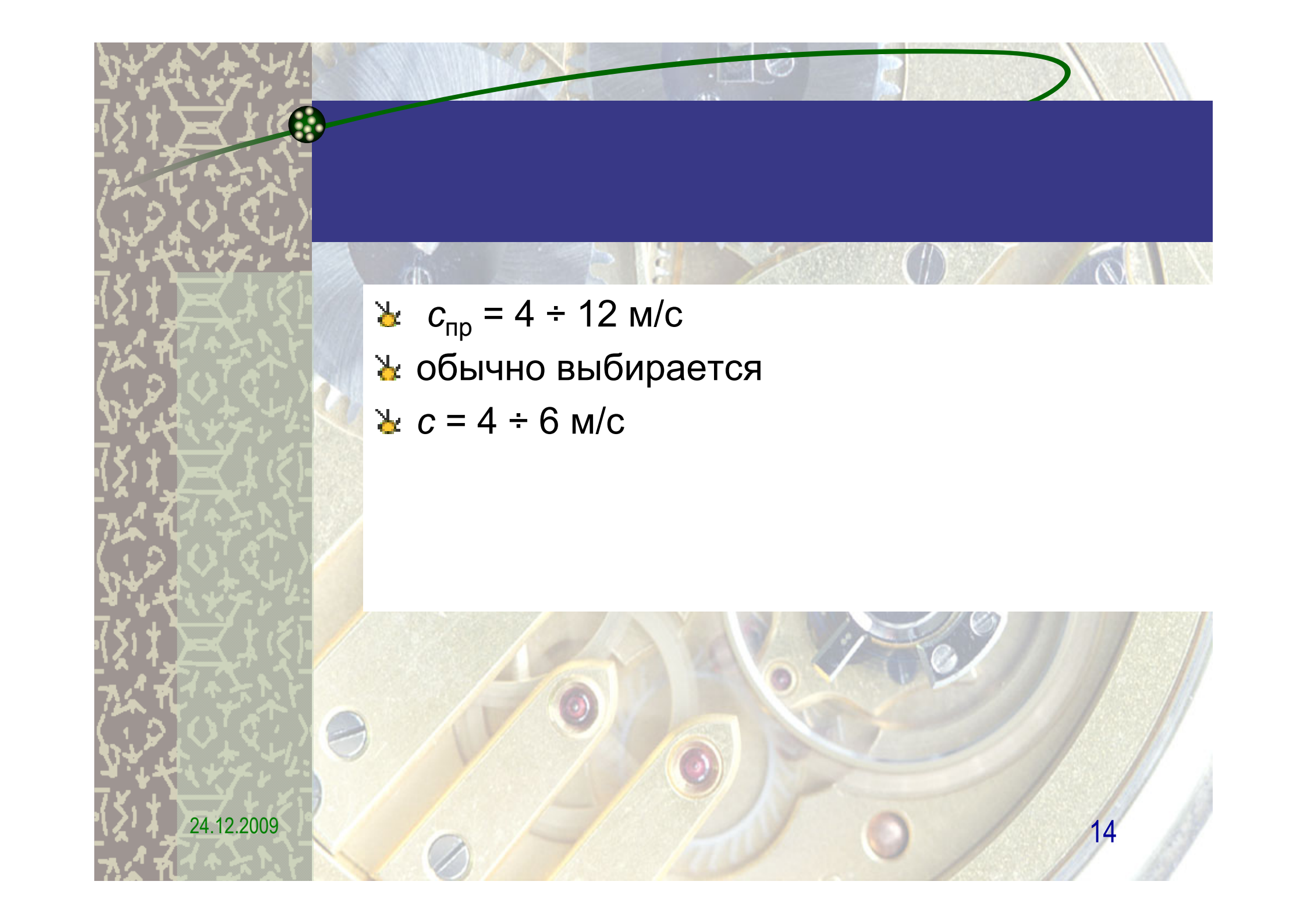
## Роль скорости потока

- ☛ Выше скорость пара  $\longrightarrow$  меньше размеры сепаратора
- ☛ при предельном значении скорости  $c_{пр}$  пленка уносится потоком  $\longrightarrow$  эффективность сепарации снижается



при  $c < c_{\text{пр}}$

- ⚡ ↑ скорости потока → ↑ эффективность осаждения → ↓ влажность на выходе С
- ⚡ Скорость пара должна быть с запасом меньше предельной

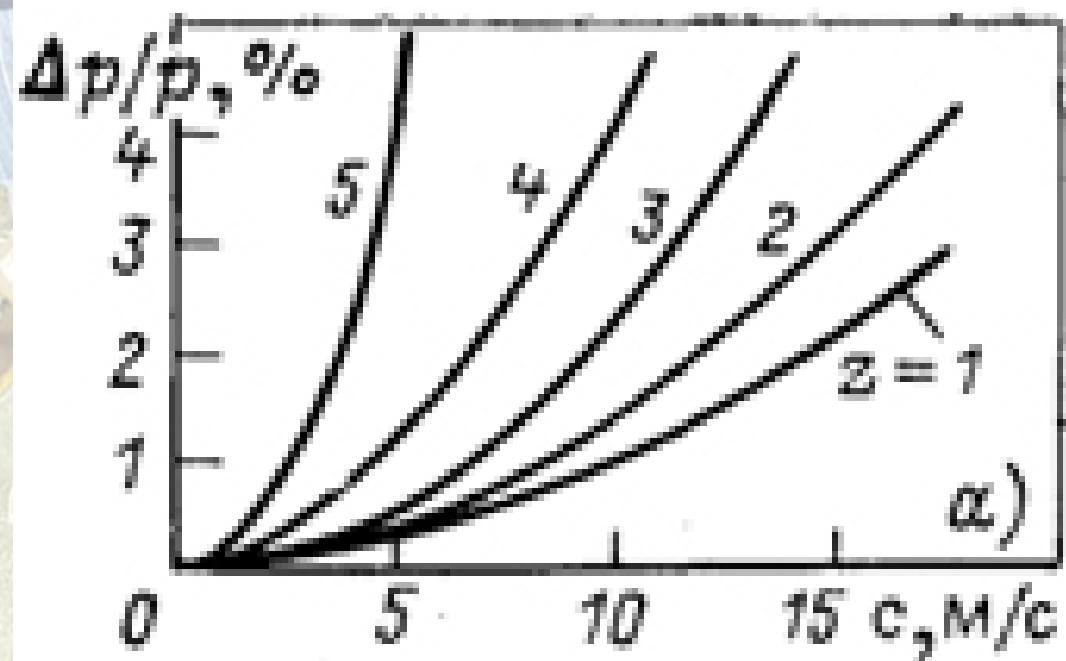


✂  $c_{пр} = 4 \div 12 \text{ м/с}$

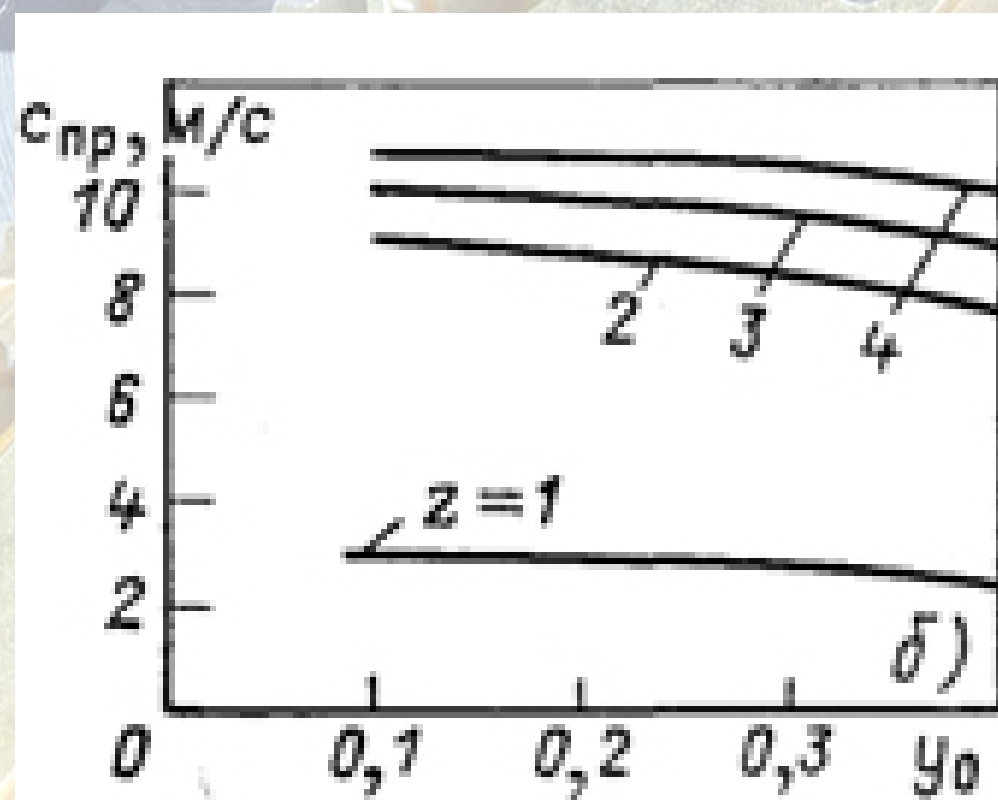
✂ обычно выбирается

✂  $c = 4 \div 6 \text{ м/с}$

## Характеристики сепарационных устройств



## Характеристики сепарационных устройств

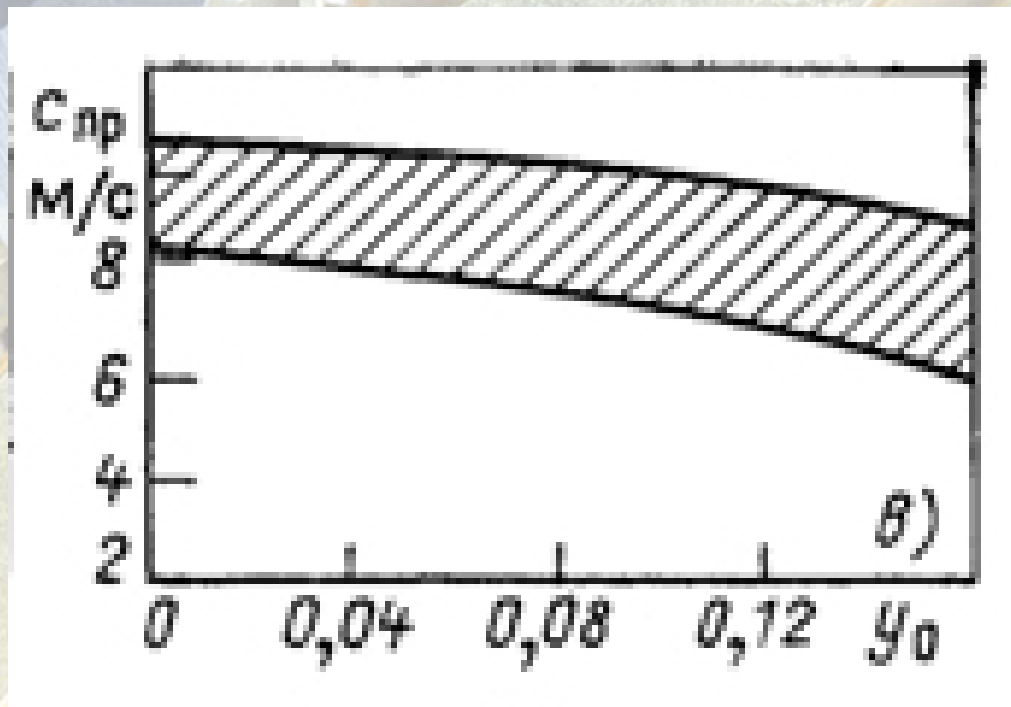


24.12.2009

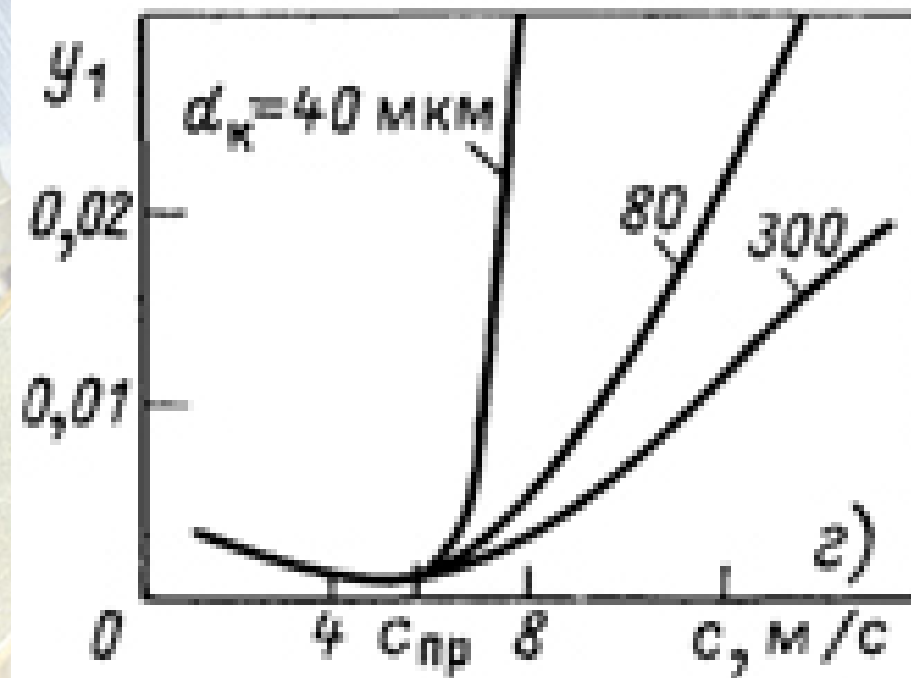
$C_{пр}$  - предельная скорость



# Характеристики сепарационных устройств



## Характеристики сепарационных устройств



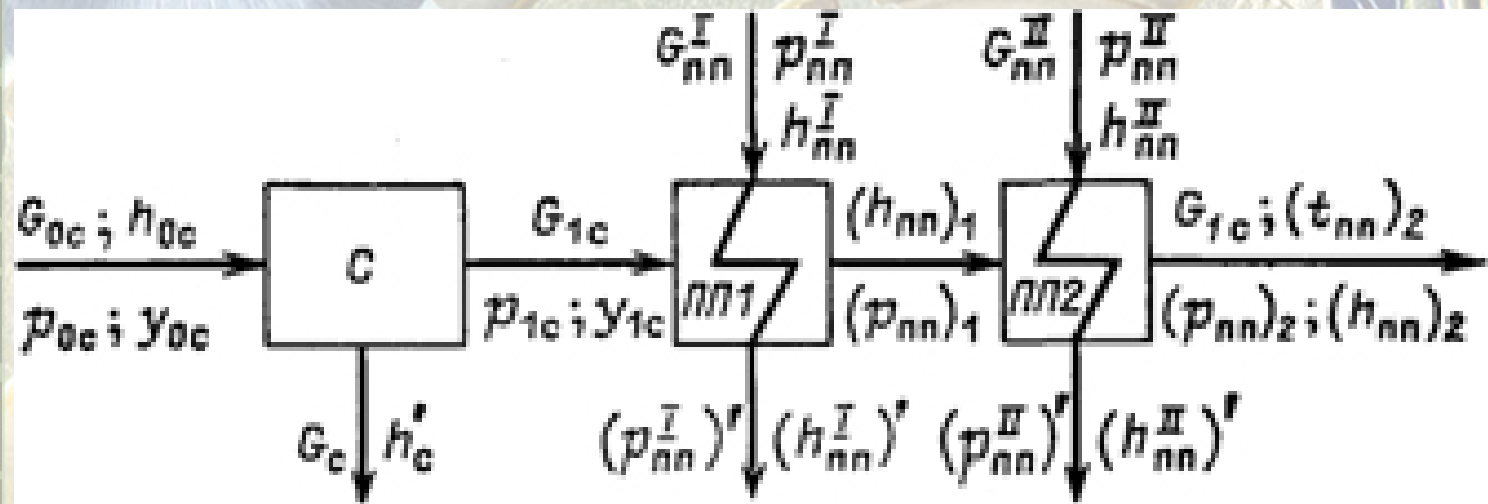
24.12.2009

$d_k$  - размер капель влаги на входе

## Потери давления основного потока

- ✦  $\Delta p_c = 2,5 \div 3,5 \%$  от давления перед ним
- ✦ потери в тракте от ЦВД до сепаратора  
 $\Delta p_{вх} = 0,5 \div 0,7 \%$

## Определение расхода пара после сепаратора





## Промежуточный пароперегреватель

- ⚡ Перегрев пара производится только в поверхностных перегревателях
- ⚡ греющий пар может проходить внутри трубок, либо между ними



## ПЕРЕХОД К ДВУХСТУПЕНЧАТОМУ ПЕРЕГРЕВУ

- ✚ дает *небольшие* преимущества
- ✚ одноступенчатый перегрев конструктивно и компоновочно проще

*Для мощной турбины одноступенчатый перегрев становится предпочтительным*



## Двухступенчатый перегрев

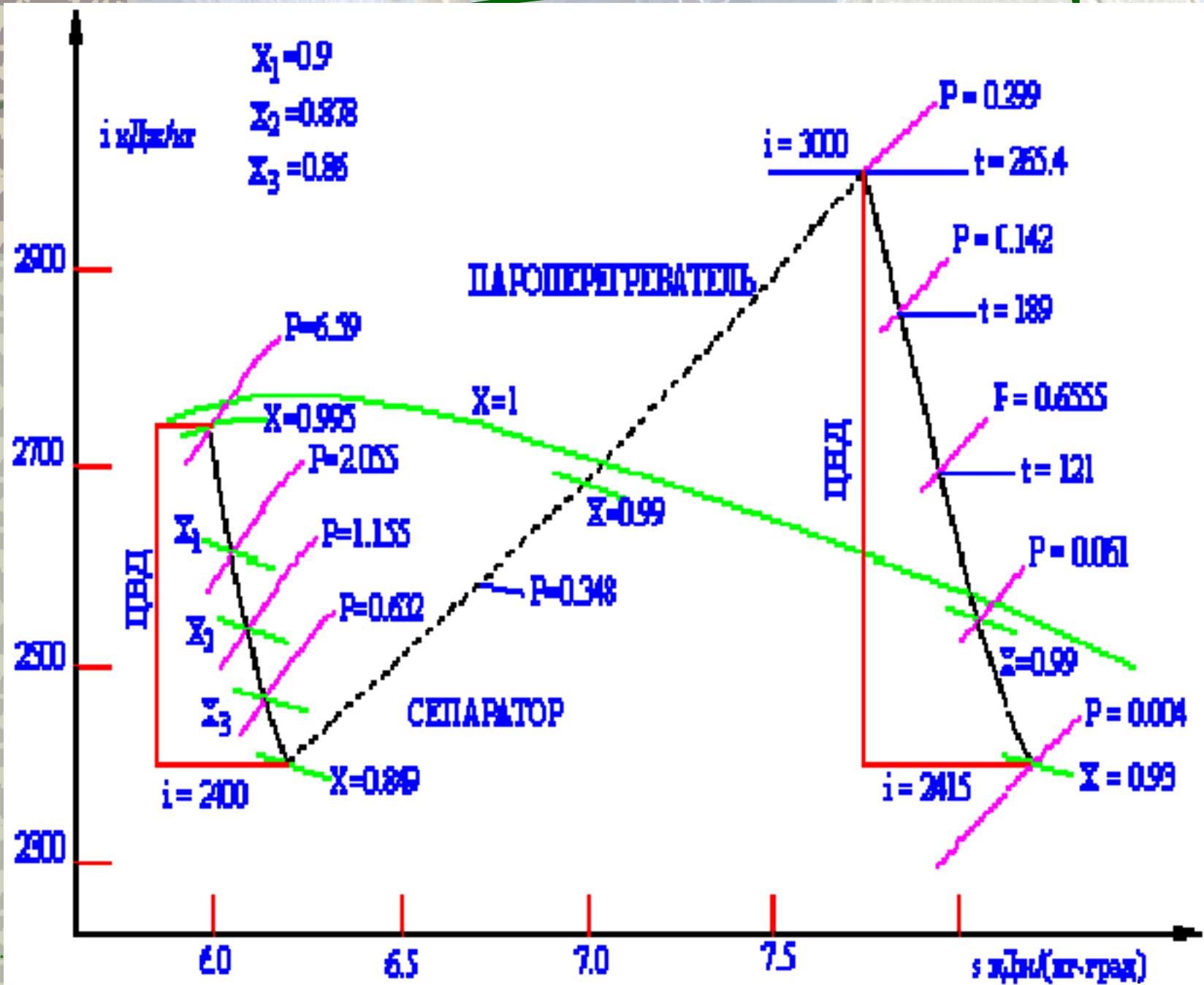
повышает экономичность турбоустановки  
примерно на 0,3 - 0,5 %



## Разделение промперегревателя на ступени

- ✦ одинаковое повышение температуры  
либо
- ✦ одинаковый прирост энтальпии в ступенях  
перегрева





## Потери давления

✎ ОСНОВНОГО ПОТОКА:

**1,5 - 3 %** давления перед СПП

✎ греющего пара от СК или от патрубка отбора из ЦВД до выхода конденсата из СПП:

**1 – 2 %**

## Количество греющего пара

☛ по тепловому балансу перегревателя

Известны:

☛ расход основного потока

☛ параметры основного потока

☛ параметры греющего пара

☛ определяющий параметр -  $t_{пп}$

## Дополнительные трудности при двухступенчатом перегреве

- ☛ увеличение паро- и конденсатопроводов, количества арматуры
- ☛ усложнение обвязки
- ☛ снижение надежности

Некоторые установки выполняются с одной ступенью промежуточного перегрева


- ☛ пример: К - 1000 - 60/3000

## Материал для теплообменной поверхности пароперегревателя

☛ рекомендуется сталь **08Х14МФ**

Достоинства:

- ☛ не склонна к коррозии под напряжением
- ☛ дешевле стали 1Х18Н9Т
- ☛ отсутствует никель
- ☛ сталь **08Х14МФ** успешно работает в СПП на Курской АЭС



## Конструкция сепаратора-пароперегревателя

- ✦ один аппарат - СПП
- ✦ в мощных турбинах по 2 или 4 параллельно работающих СПП
- ✦ 1 СПП может питать 1 или 2 ЦНД



## Преимущества:

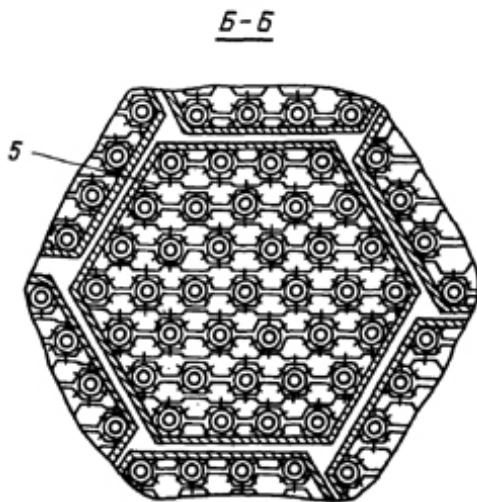
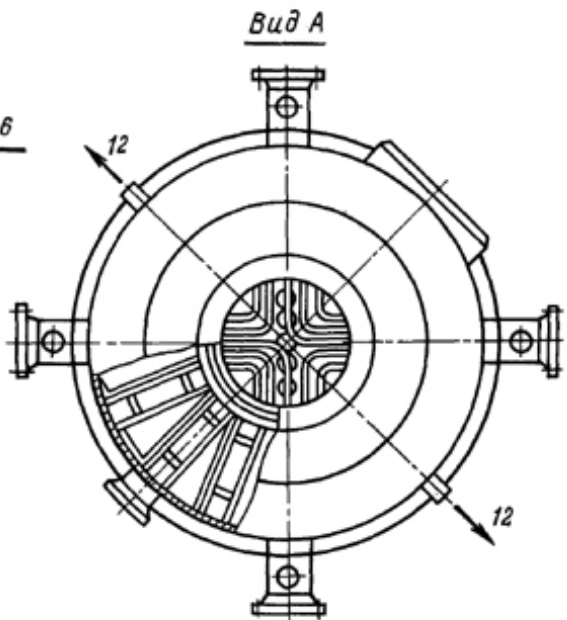
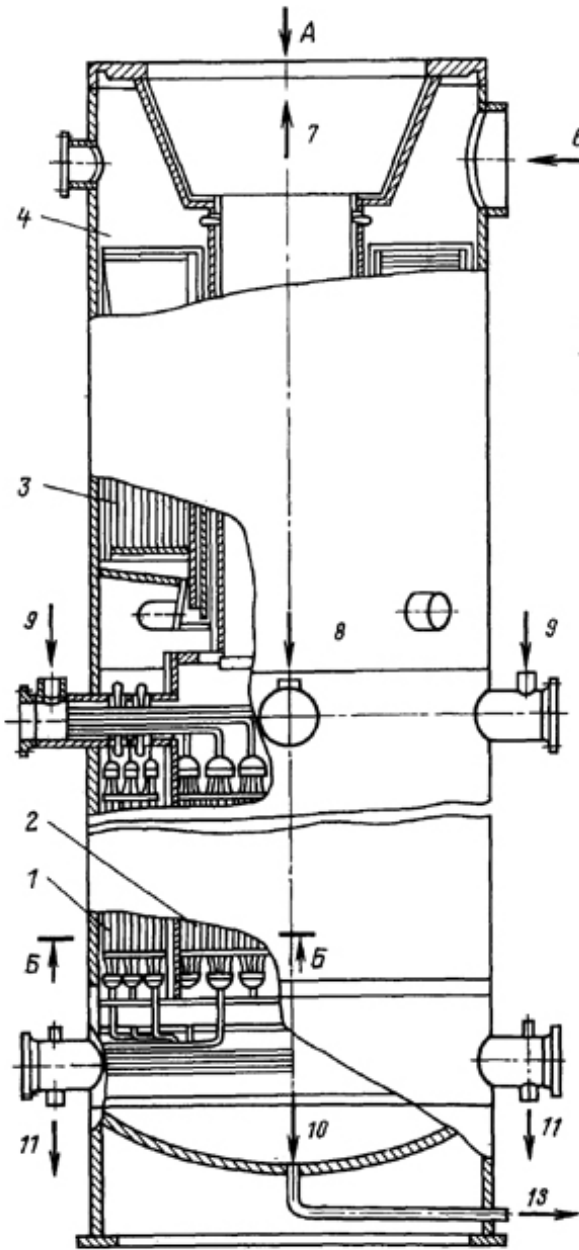
- ✦ упрощение всей турбоустановки
- ✦ сокращение габаритов
- ✦ уменьшение расхода металла
- ✦ снижение потерь давления

## Расположение СПП

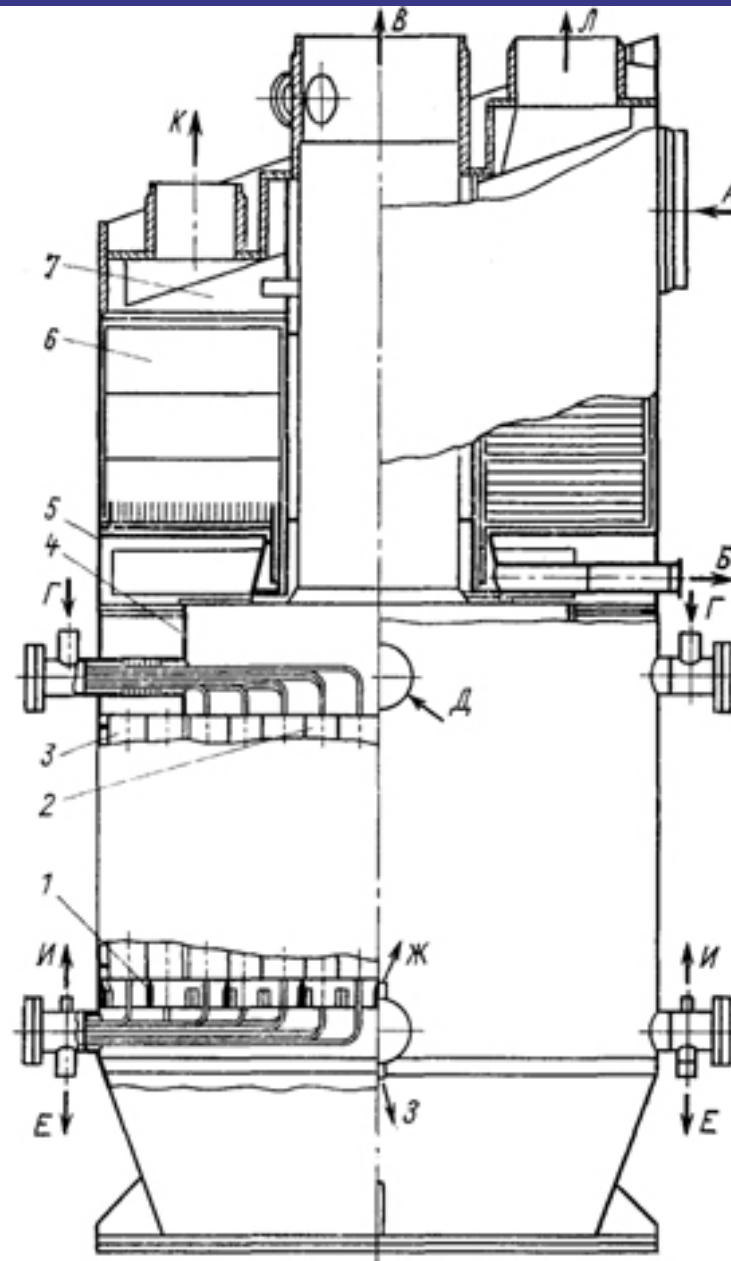
- ☛ горизонтальные
- ☛ вертикальные
- ☛ На отечественных АЭС применяются СПП только **вертикального** типа



# Сепаратор-пароперегреватель СПП-220 ХТЗ



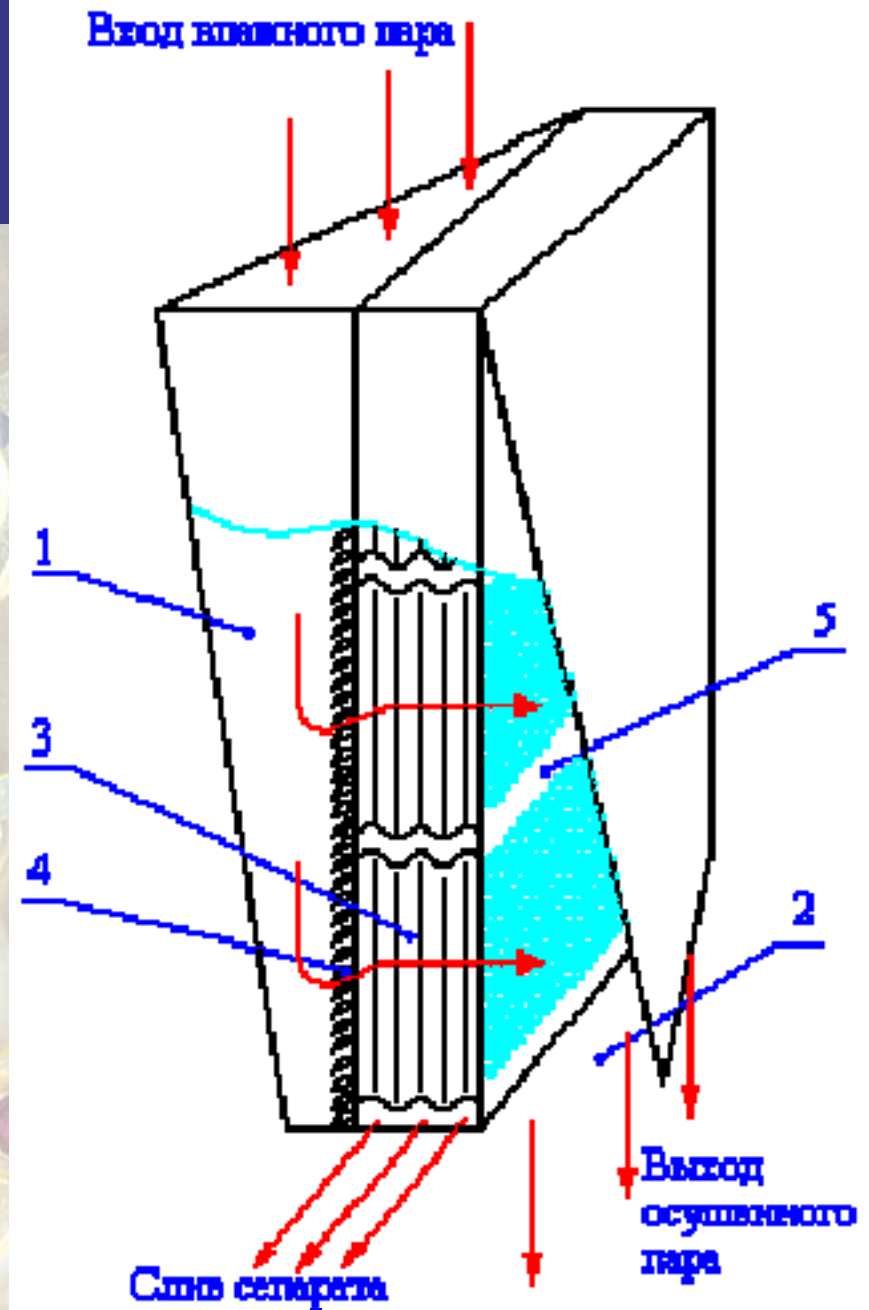
# Сепаратор-пароперегреватель СПП-500-1



## Схема сепарационного блока

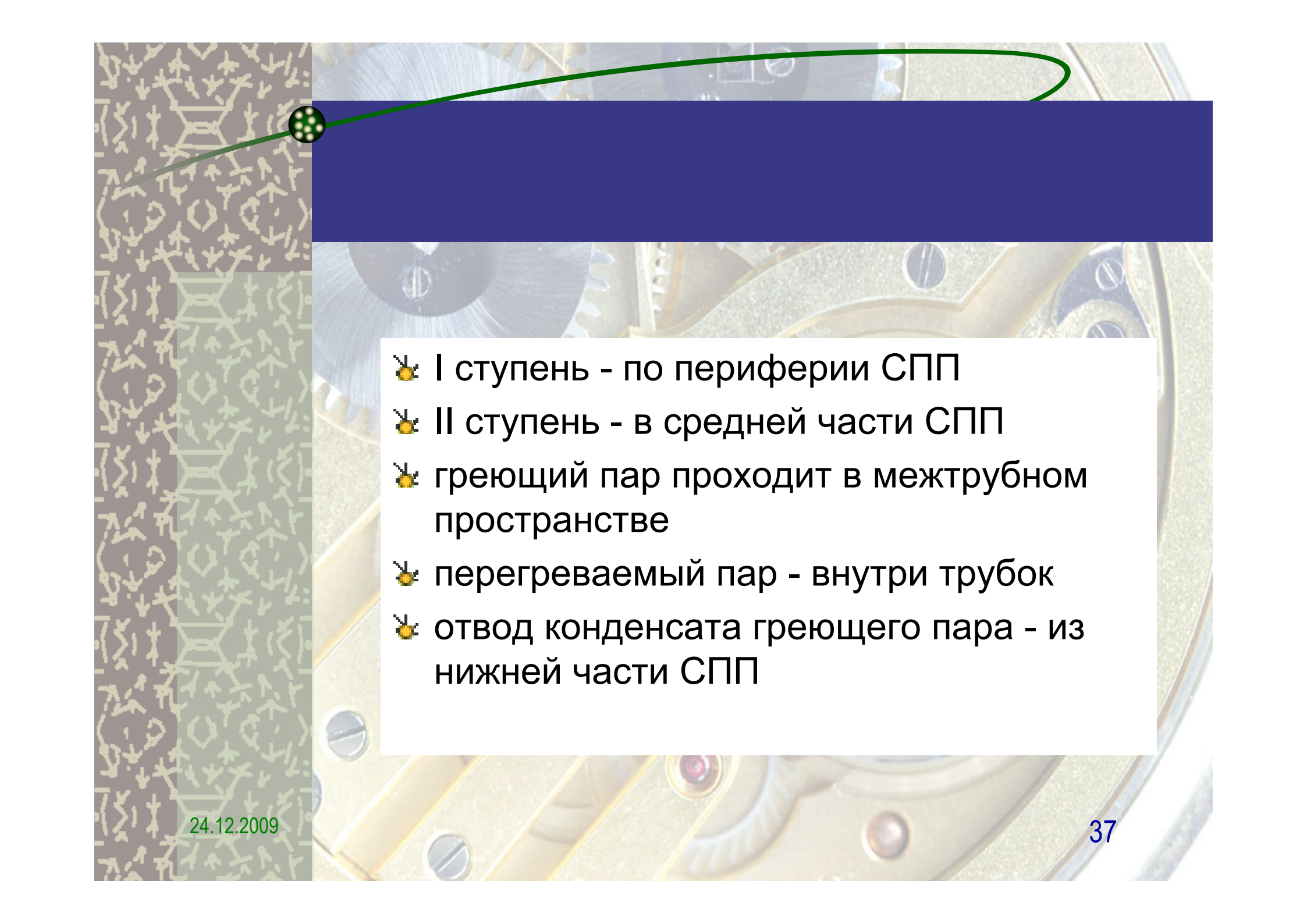
- 1 — входной канал
- 2 — выходной канал
- 3 — жалюзийные пластины
- 4 — направляющие лопатки
- 5 — дырчатый лист

24.12.2009



## Перегревательные поверхности

- ☛ состоят из модулей
  - I степень промперегрева - 60 модулей
  - II степень - 70
- ☛ модули устанавливаются на опорной решетке
- ☛ в каждом модуле в трубных досках развальцованы и приварены трубки
- ☛ диаметр трубок 14 мм

- 
- ✦ I ступень - по периферии СПП
  - ✦ II ступень - в средней части СПП
  - ✦ греющий пар проходит в межтрубном пространстве
  - ✦ перегреваемый пар - внутри трубок
  - ✦ отвод конденсата греющего пара - из нижней части СПП

## Основные характеристики СПП

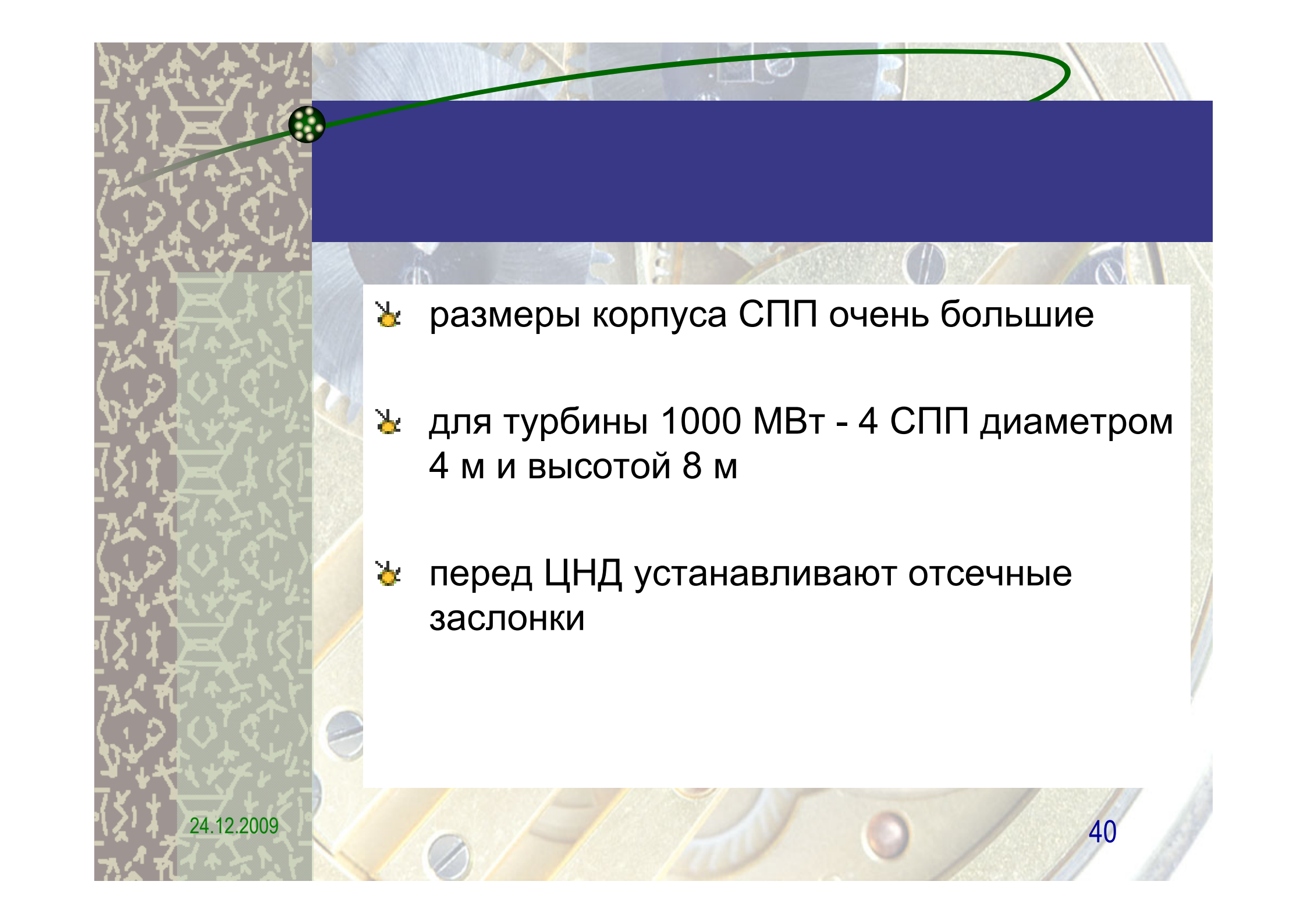
Марка турбины	Тип	Число аппаратов	Число ступеней перегрева	Греющий пар <sup>1</sup>		
				$p$ , МПа	$t$ , °C	$D$ , кг/с
К-220-44 ХТЗ	СПП-220-1	2	2	1,85/4,23	208/253	8,9/7,9
К-500-65 ХТЗ	СПП-500-1	4	2	1,85/6,27	203/278	8,8/11,7
К-750-65 ХТЗ	СПП-750	4	1	6,2	278	31,1
К-1000-60 ХТЗ	СПП-1000	4	2	2,7/5,7	228/272	11,8/18,7

<sup>1</sup> В числителе — первая ступень промпарегрева, в знаменателе — вторая.

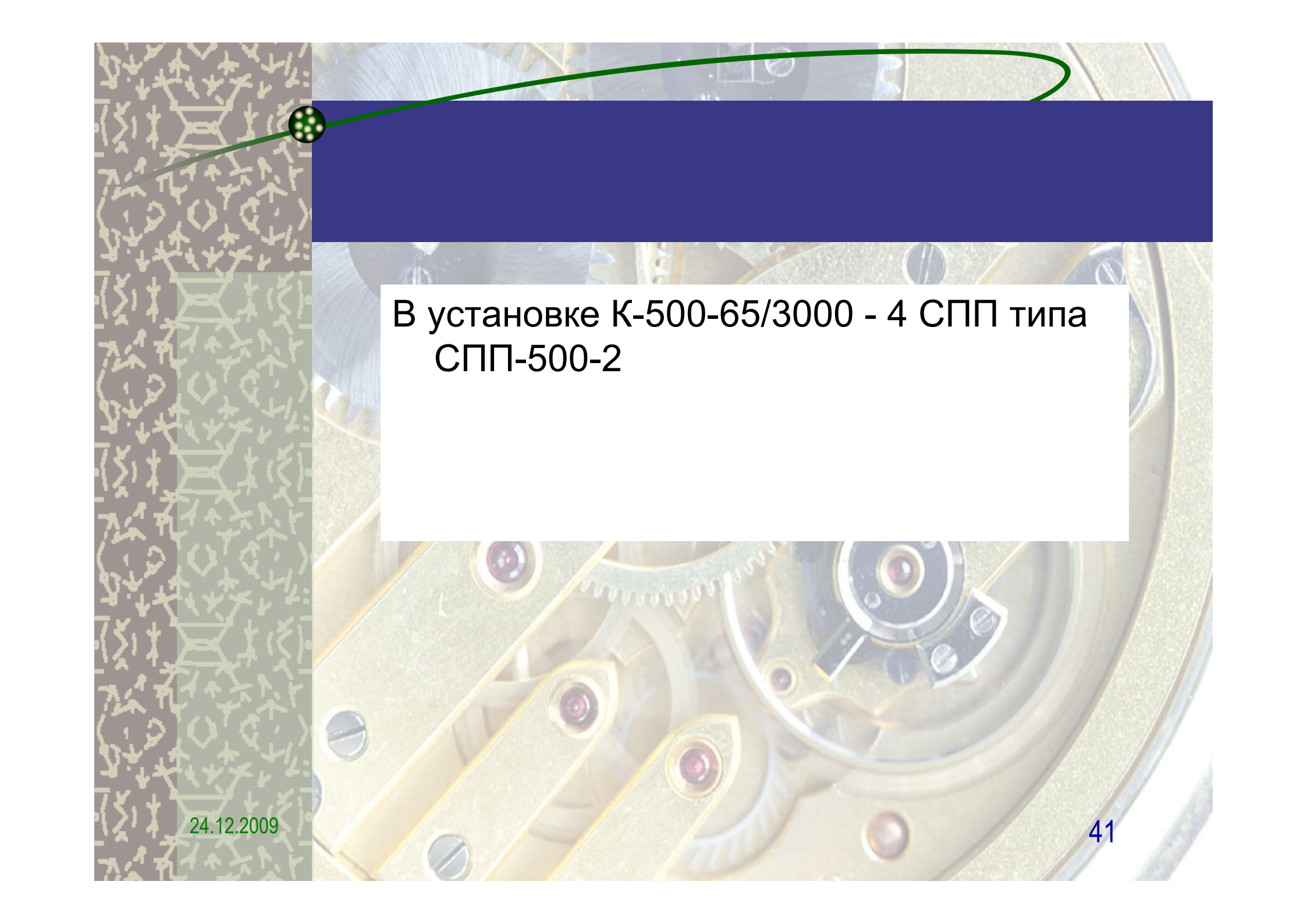
Основной поток				Число труб промпарегревателя
на входе		на выходе <sup>1</sup>		
$p$ , МПа	$D$ , кг/с	$y$	$t$ , °C	
0,3	136	0,13	193/241	6920
0,34	141	0,10	190/263	32 400
0,47	181	0,13	263	8450
1,19	328	0,11	250	6770

## Условия надежной работы турбины и СПП

- ✚ удаление сепарата и КГП в промежуточные емкости
- ✚ поддержание постоянного уровня сепарата и КГП в промежуточных емкостях
- ✚ удаление из СПП неконденсирующихся газов
- ✚ защита СПП от недопустимого повышения давления в них

- 
- ✦ размеры корпуса СПП очень большие
  - ✦ для турбины 1000 МВт - 4 СПП диаметром 4 м и высотой 8 м
  - ✦ перед ЦНД устанавливают отсечные заслонки

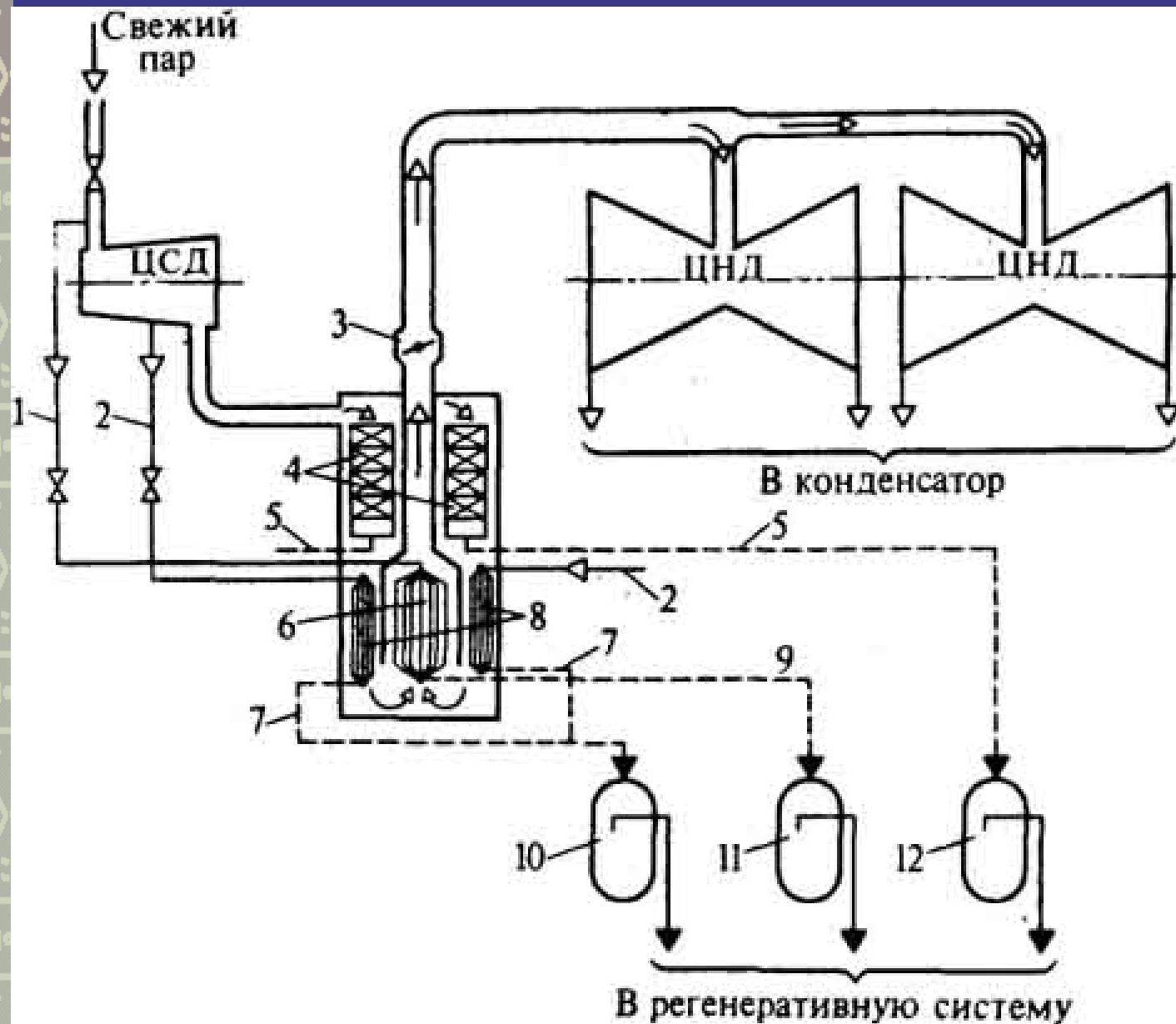


The background of the slide is a detailed close-up of a mechanical watch movement, showing various gears, levers, and jewels. A green line starts from a cluster of five green dots on the left side and curves across the top of the slide. A white rectangular box is centered on the right side, containing text.

В установке К-500-65/3000 - 4 СПП типа  
СПП-500-2

24.12.2009

# Схема установки СПП



24.12.2009

# Сепарато– и конденсатосборники

