



АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Тема 4. ПАРАМЕТРЫ И ЦИКЛЫ
РАБОЧЕГО ТЕЛА НА АЭС



Основные вопросы:

- ✦ Начальные параметры пара
- ✦ Цикл Карно и цикл Ренкина на насыщенном паре
- ✦ Использование перегретого пара на АЭС
- ✦ Промежуточная сепарация пара
- ✦ Промежуточный перегрев пара на АЭС

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. The text is overlaid on a dark blue horizontal bar at the top and a white rectangular box in the center.

Начальные параметры пара на АЭС

находятся в прямой зависимости от параметров **теплоносителя**

The background of the slide is a detailed close-up of a mechanical watch movement, showing various gears, plates, and jewels. A green line starts from a small cluster of five green dots on the left side and curves across the top of the slide. A dark blue horizontal bar is positioned below the line, containing the main title.

Для водного теплоносителя

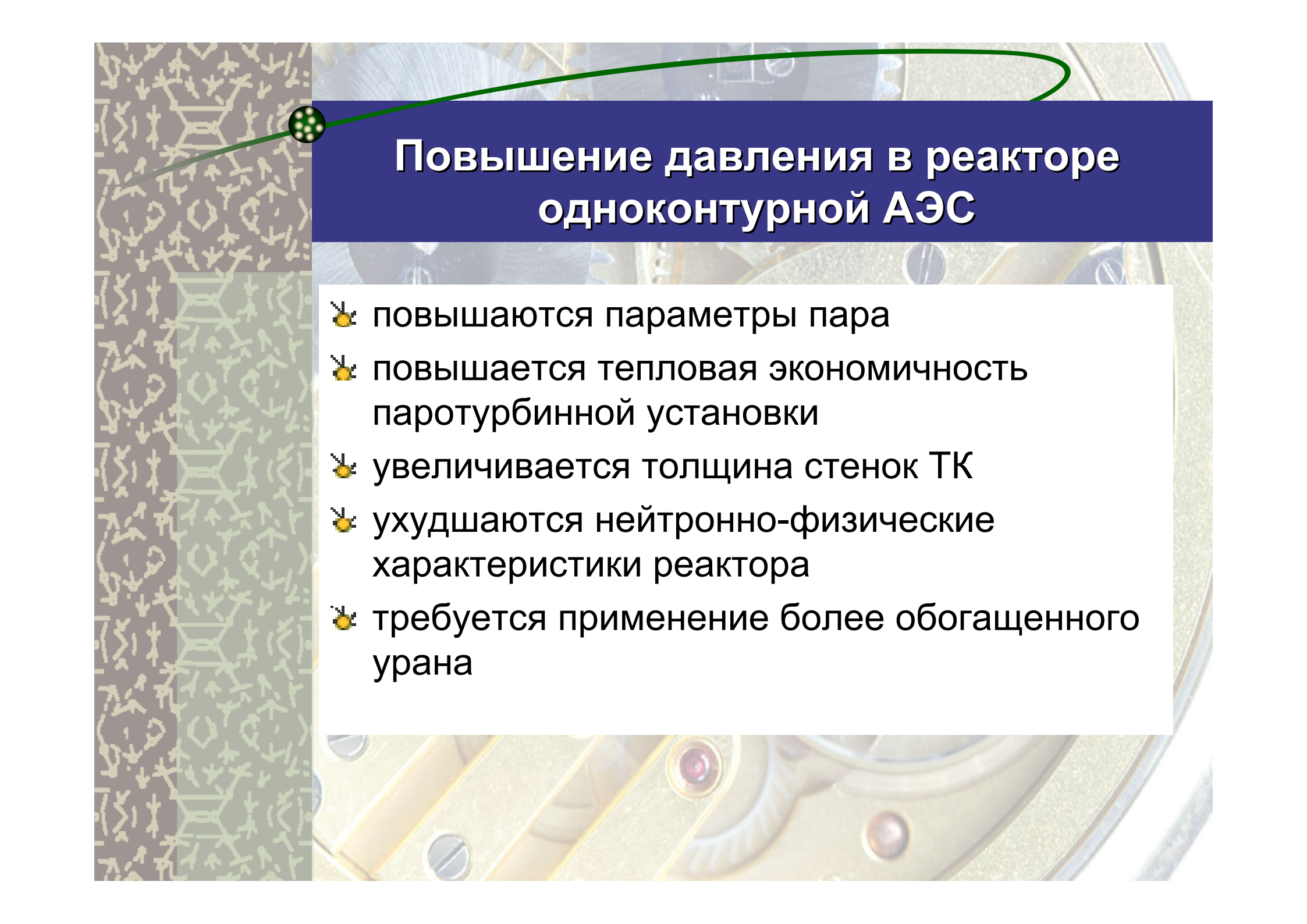
температура пара перед турбиной ниже критической



Для одноконтурной АЭС

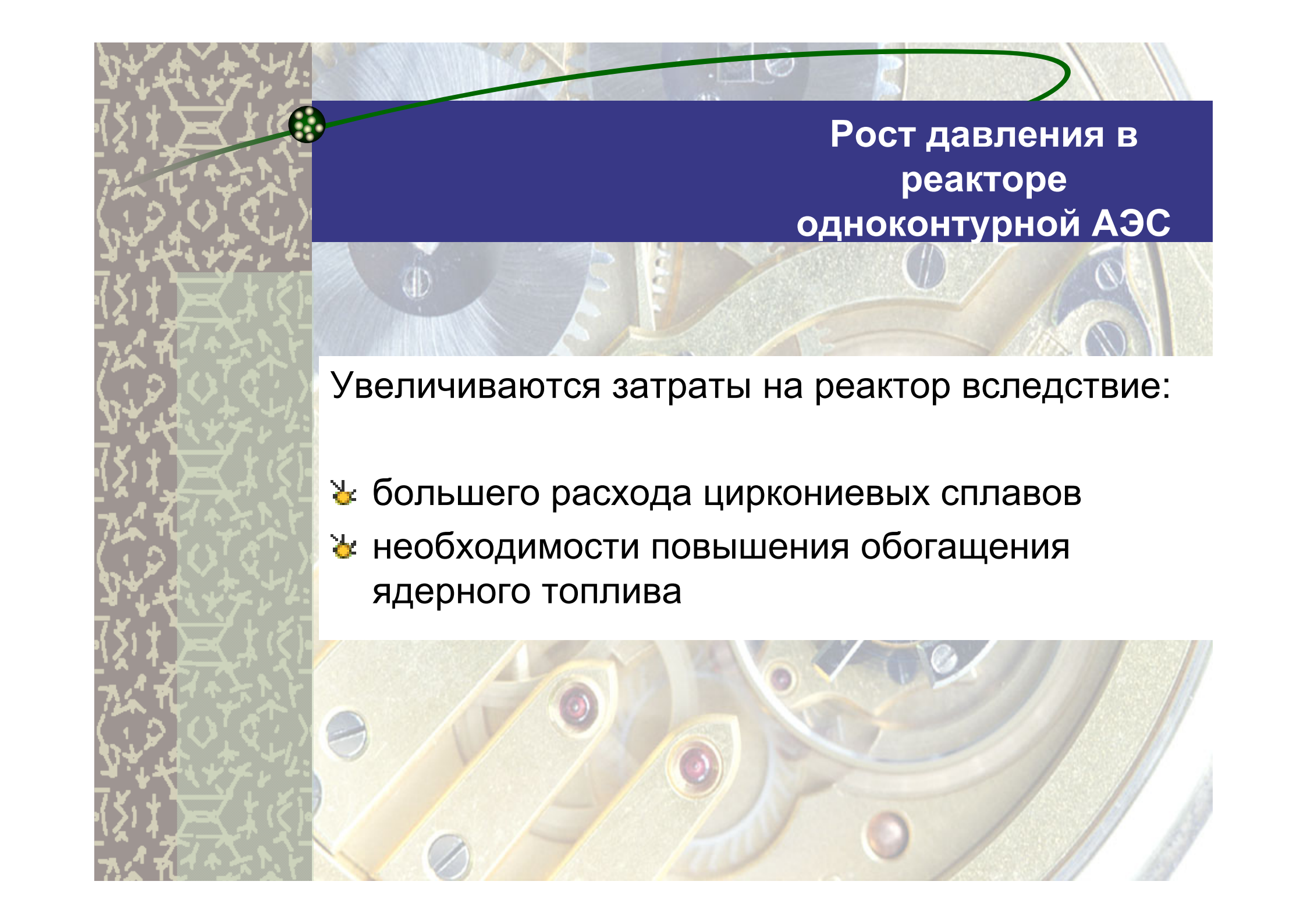
теплоноситель реактора

- ❖ вода
- ❖ пароводяная смесь



Повышение давления в реакторе одноконтурной АЭС

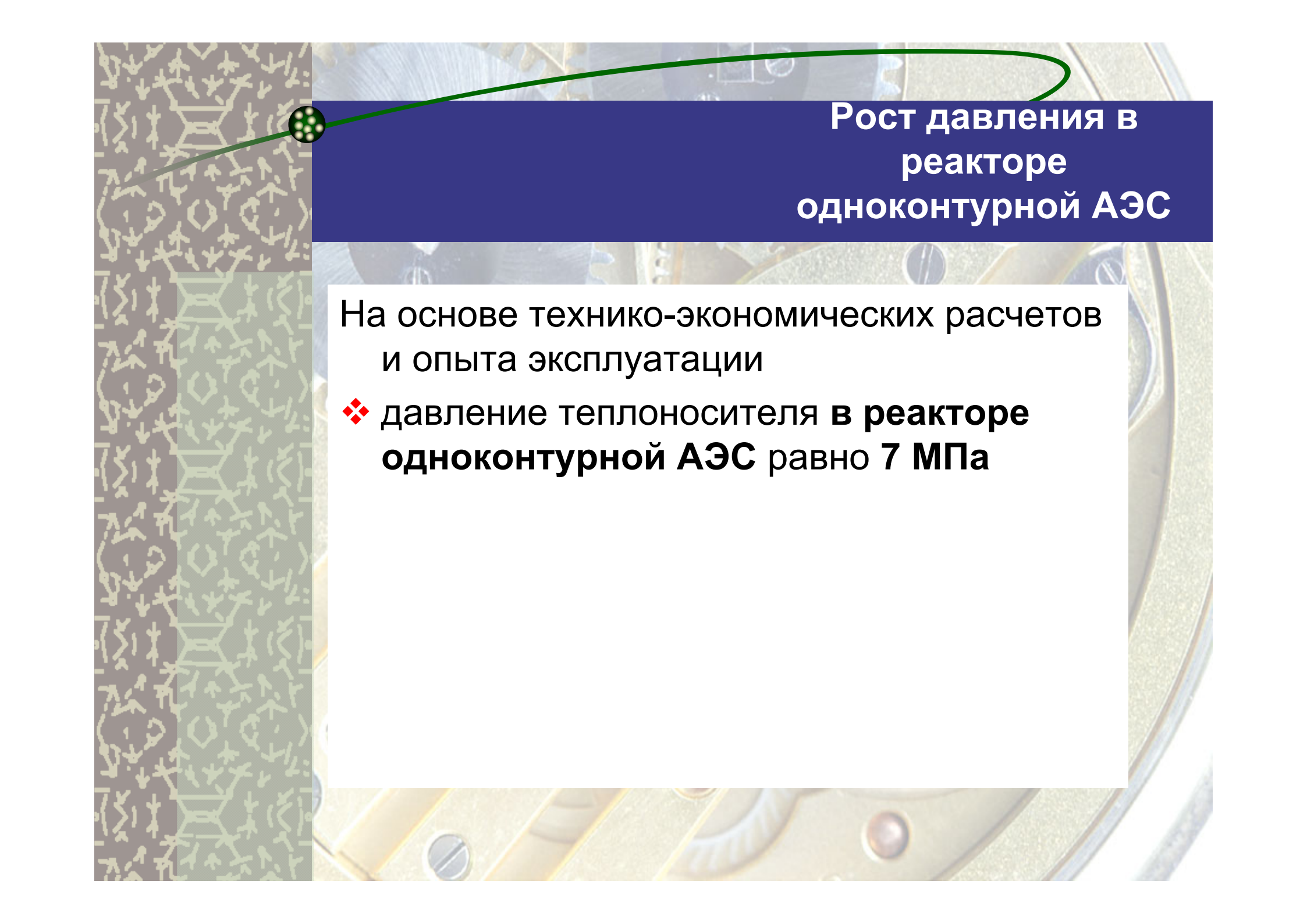
- ☛ повышаются параметры пара
- ☛ повышается тепловая экономичность паротурбинной установки
- ☛ увеличивается толщина стенок ТК
- ☛ ухудшаются нейтронно-физические характеристики реактора
- ☛ требуется применение более обогащенного урана



Рост давления в реакторе одноконтурной АЭС

Увеличиваются затраты на реактор вследствие:

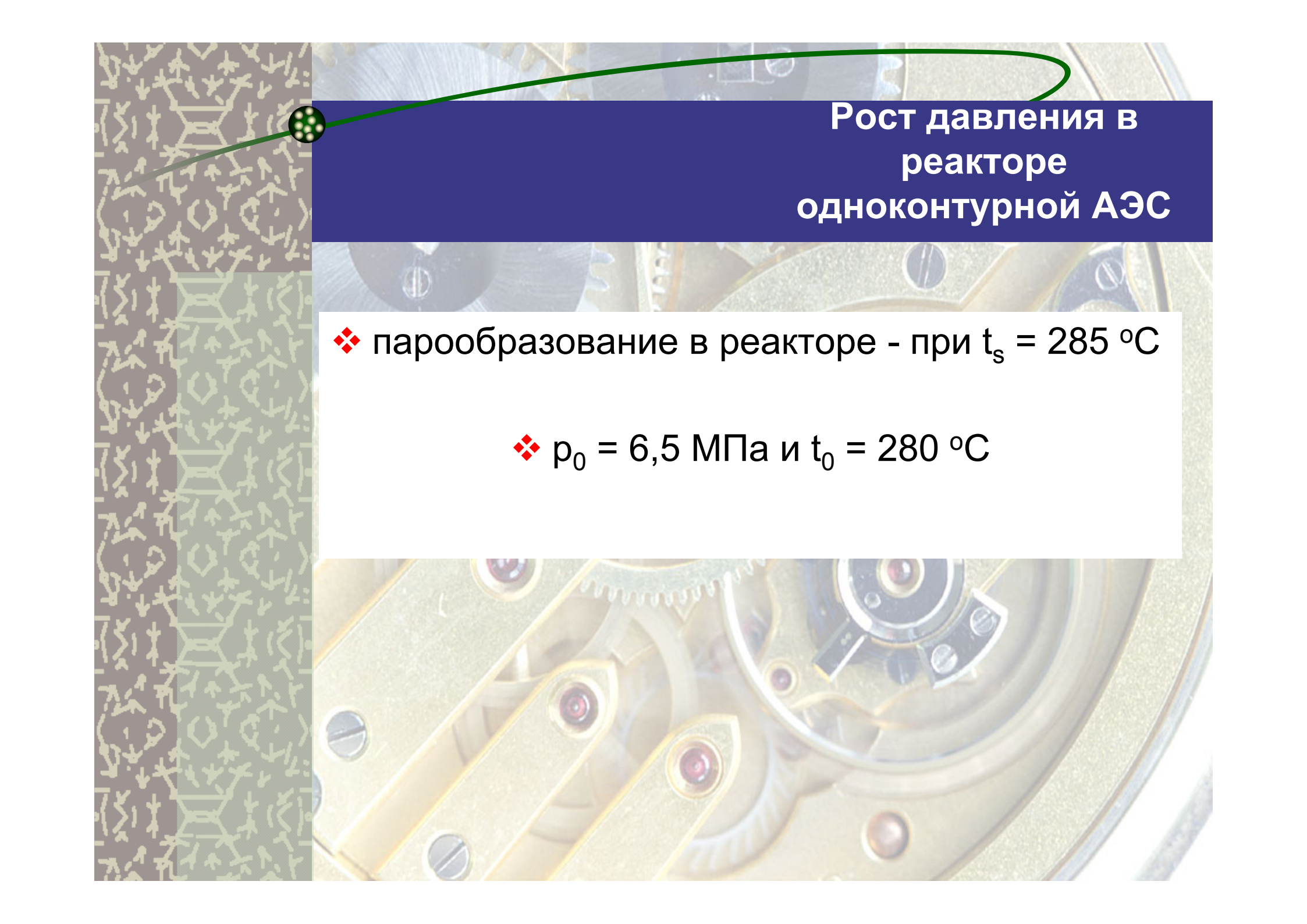
- ✂️ большего расхода циркониевых сплавов
- ✂️ необходимости повышения обогащения ядерного топлива



Рост давления в реакторе одноконтурной АЭС

На основе технико-экономических расчетов
и опыта эксплуатации

- ❖ **давление теплоносителя в реакторе
одноконтурной АЭС равно 7 МПа**



Рост давления в реакторе одноконтурной АЭС

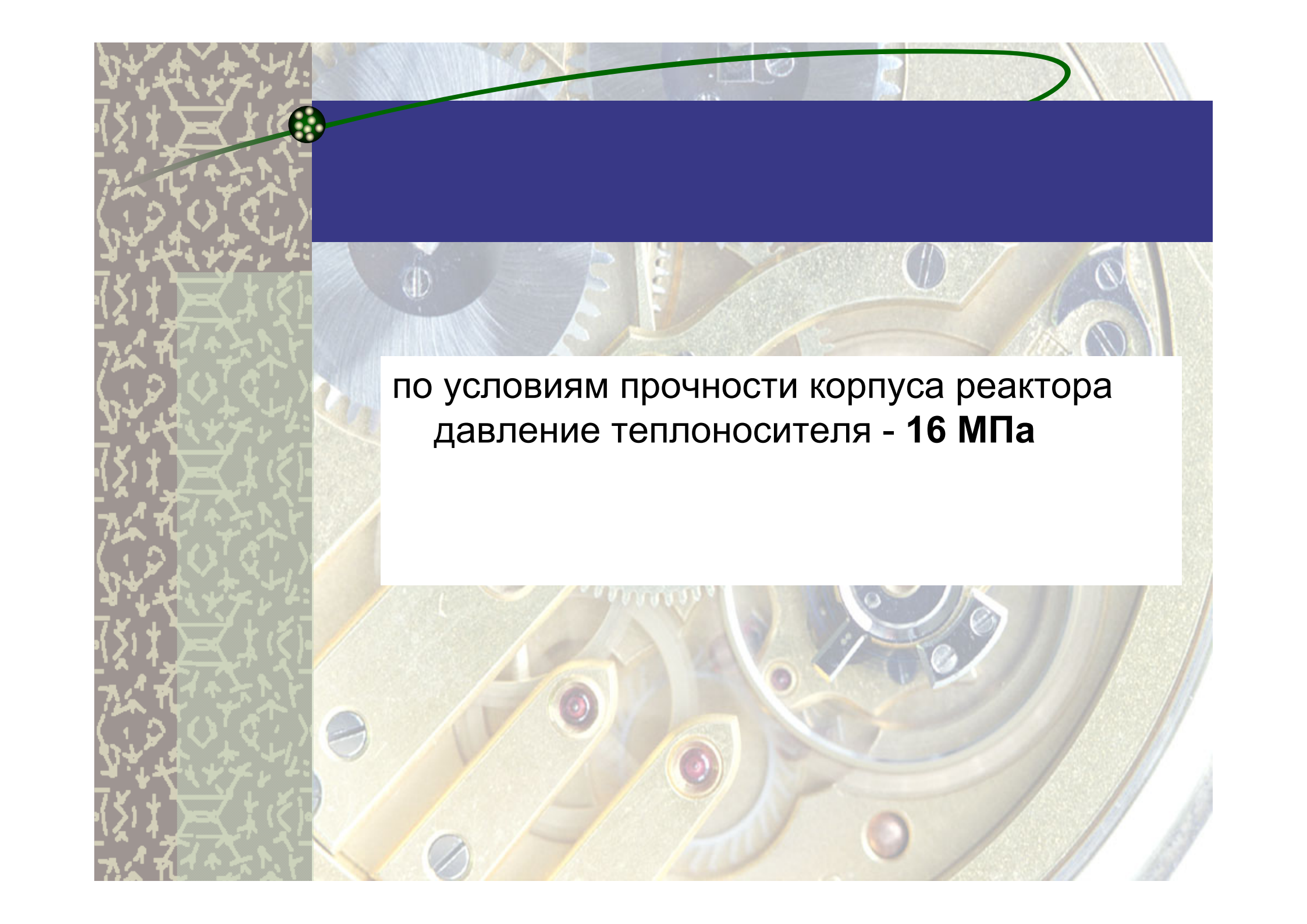
❖ парообразование в реакторе - при $t_s = 285 \text{ }^\circ\text{C}$

❖ $p_0 = 6,5 \text{ МПа}$ и $t_0 = 280 \text{ }^\circ\text{C}$




Для двухконтурной АЭС

- ❖ **Теплоноситель и замедлитель - вода под давлением**
- ❖ **циркониевые сплавы кассет активной зоны не испытывают перепада давлений**

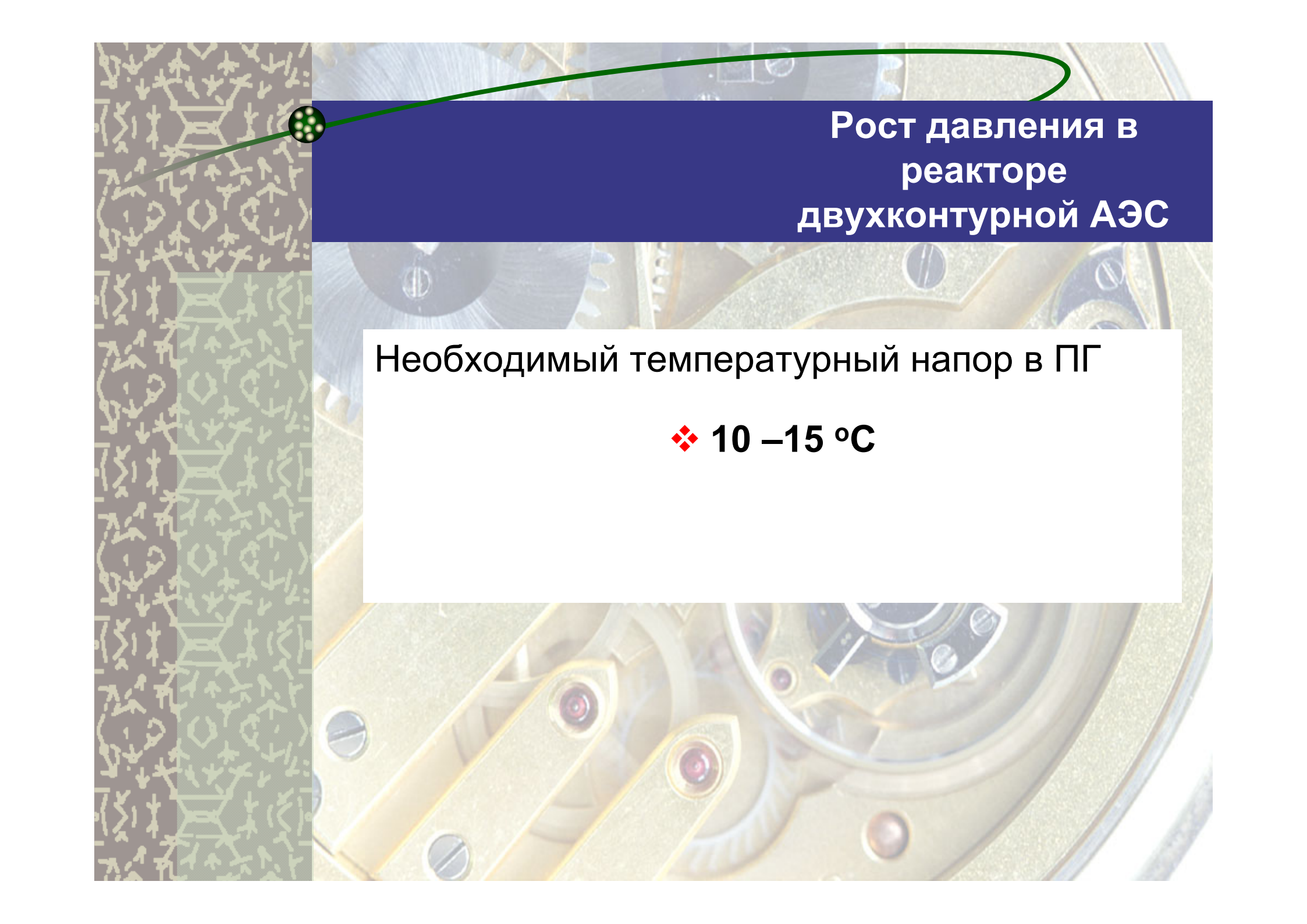


по условиям прочности корпуса реактора
давление теплоносителя - **16 МПа**



Рост давления в
реакторе
двухконтурной АЭС


Оптимальный подогрев теплоносителя в
реакторе 25 - 40 °С



Рост давления в
реакторе
двухконтурной АЭС

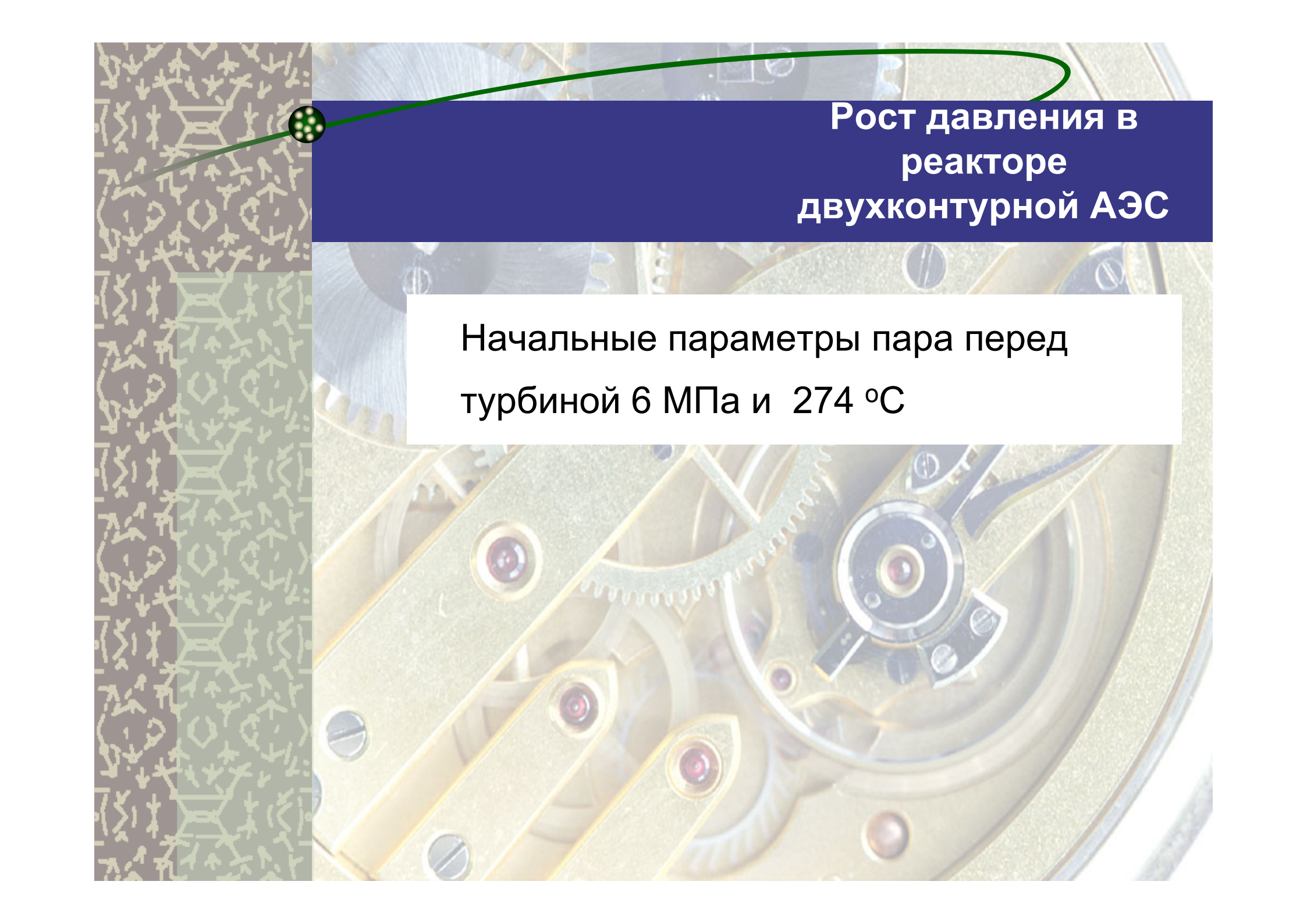
Необходимый температурный напор в ПГ

❖ **10 –15 °С**



**Рост давления в
реакторе
двухконтурной АЭС**

**температура парообразования 278 °С,
ей отвечает давление 6,4 МПа**



Рост давления в
реакторе
двухконтурной АЭС

Начальные параметры пара перед
турбиной 6 МПа и 274 °С



ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ



Цикл Карно на водяном паре

наиболее эффективный цикл теплового двигателя

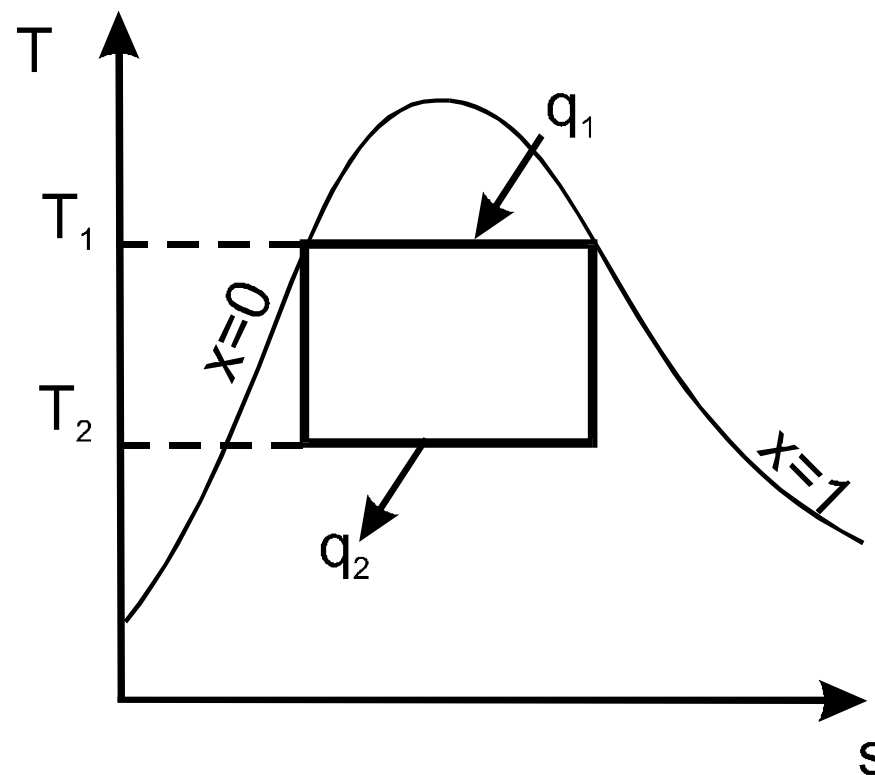


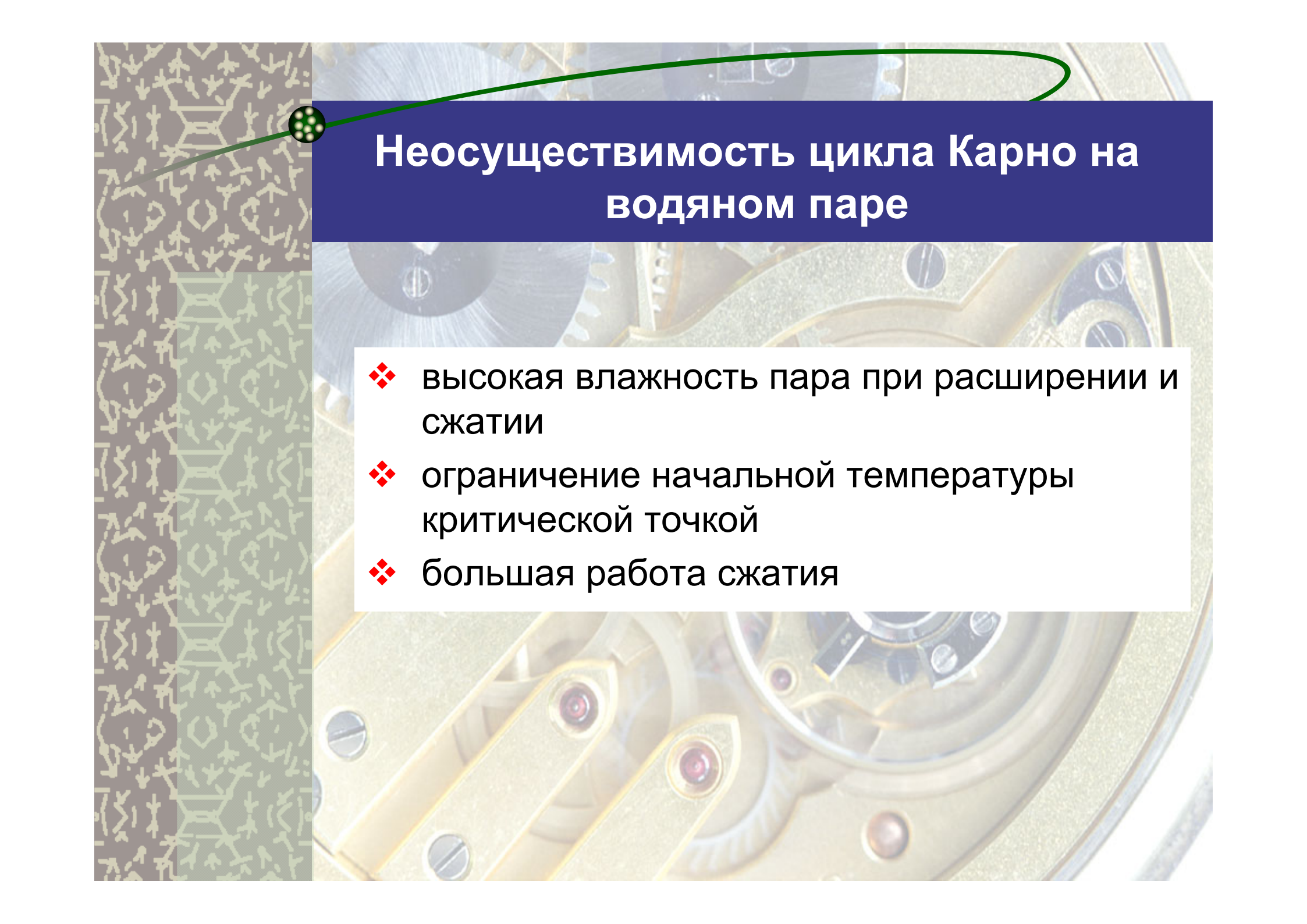
Цикл Карно на водяном паре

СОСТОИТ ИЗ

- ❖ двух адиабатных процессов - расширения и сжатия
- ❖ двух изотермических процессов - подвода и отвода теплоты

Цикл Карно на водяном паре





Неосуществимость цикла Карно на водяном паре

- ❖ высокая влажность пара при расширении и сжатии
- ❖ ограничение начальной температуры критической точкой
- ❖ большая работа сжатия



Цикл Ренкина

Основа термодинамических циклов
ТЭС и АЭС

Ренкин предложил заменить
частичную конденсацию пара при
отводе теплоты полной конденсацией

Цикл Ренкина на насыщенном паре

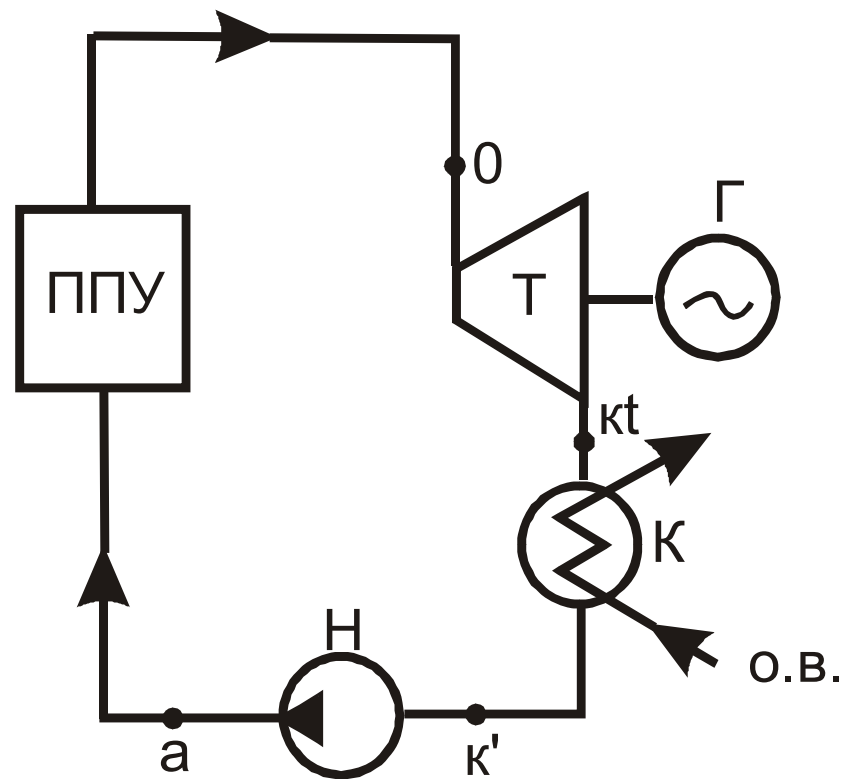
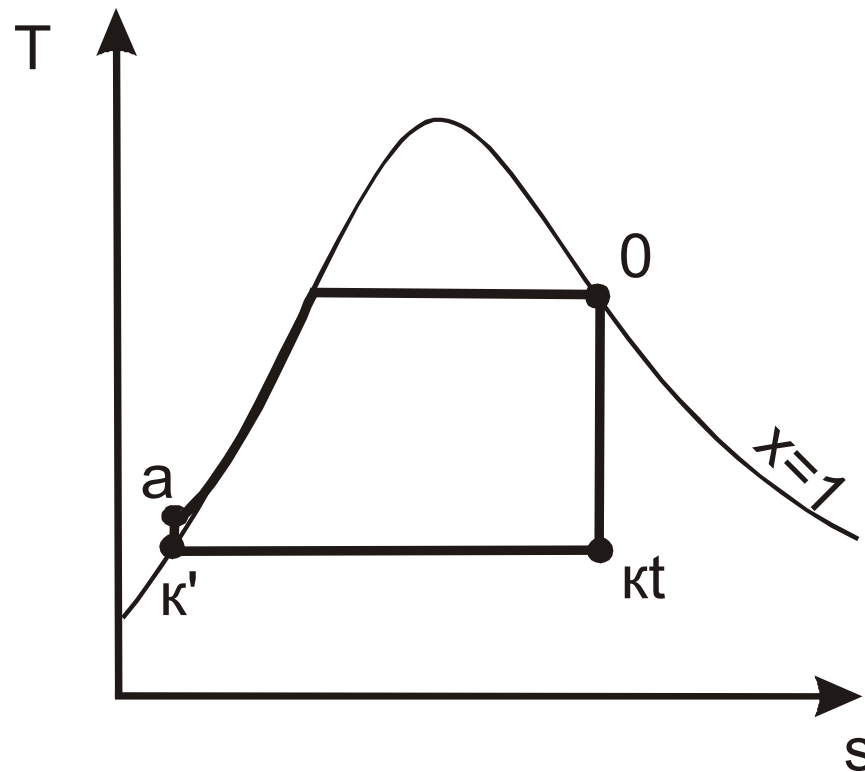
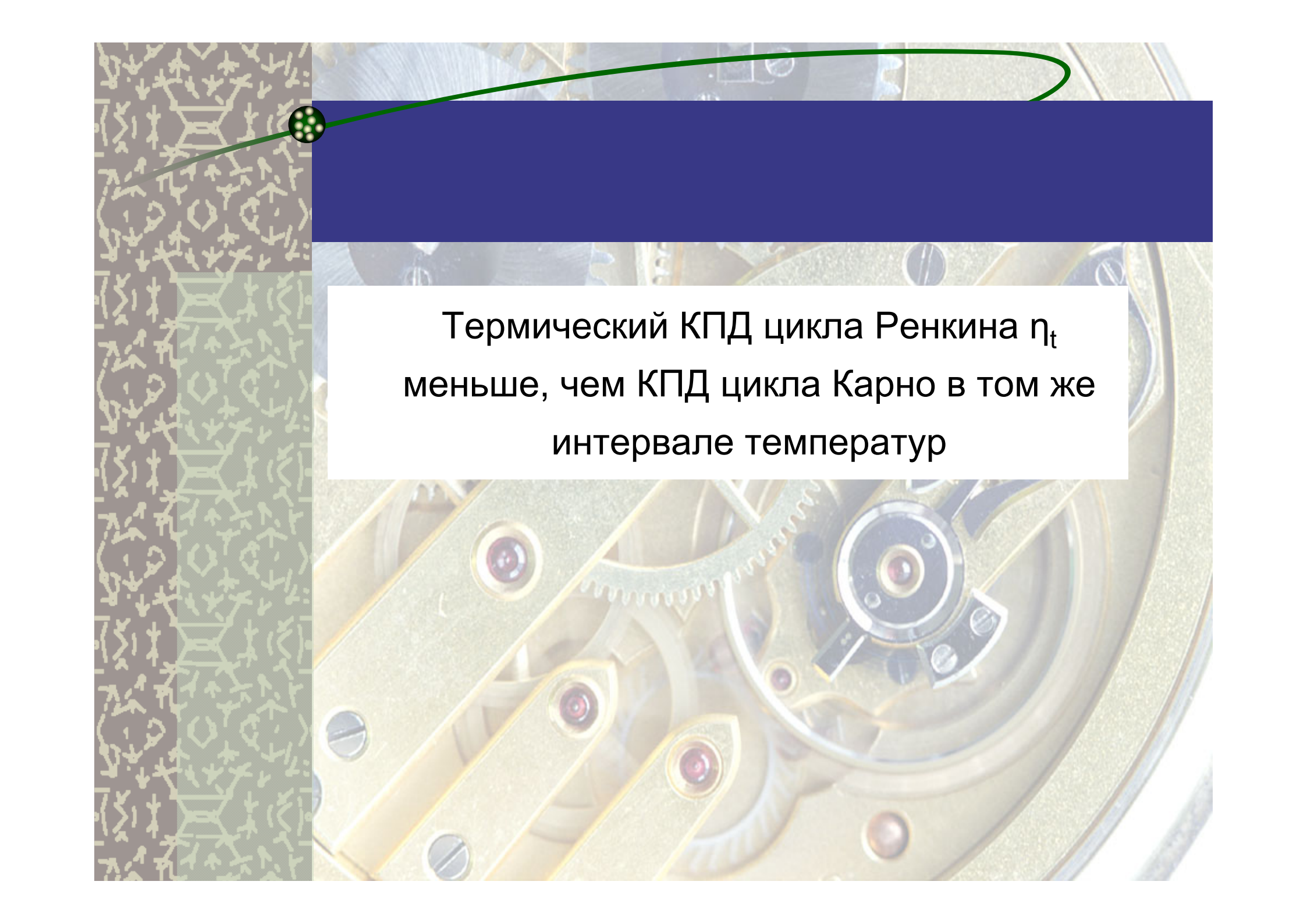


Схема установки

Цикл Ренкина на насыщенном паре в T - s - диаграмме



The background of the slide features a detailed close-up of a mechanical watch movement, showing various gears, levers, and jewels. A green line starts from a small cluster of five green dots on the left side and curves across the top of the slide. A dark blue horizontal bar is positioned below the line.

Термический КПД цикла Ренкина η_t
меньше, чем КПД цикла Карно в том же
интервале температур



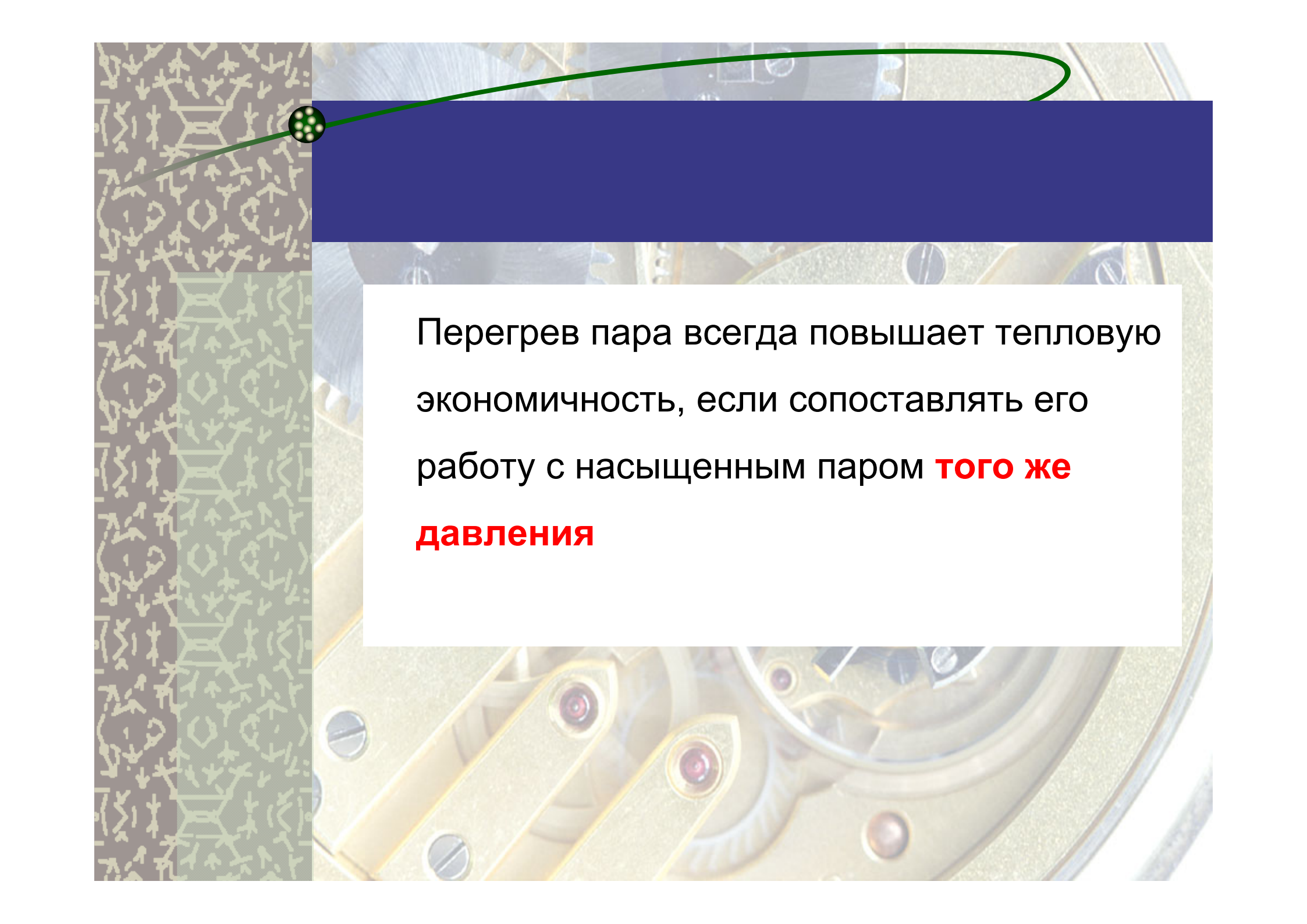
При равном начальном давлении пара

- ❖ дополнительная работа за счет перегрева больше, чем
- ❖ дополнительный отвод теплоты в холодном источнике



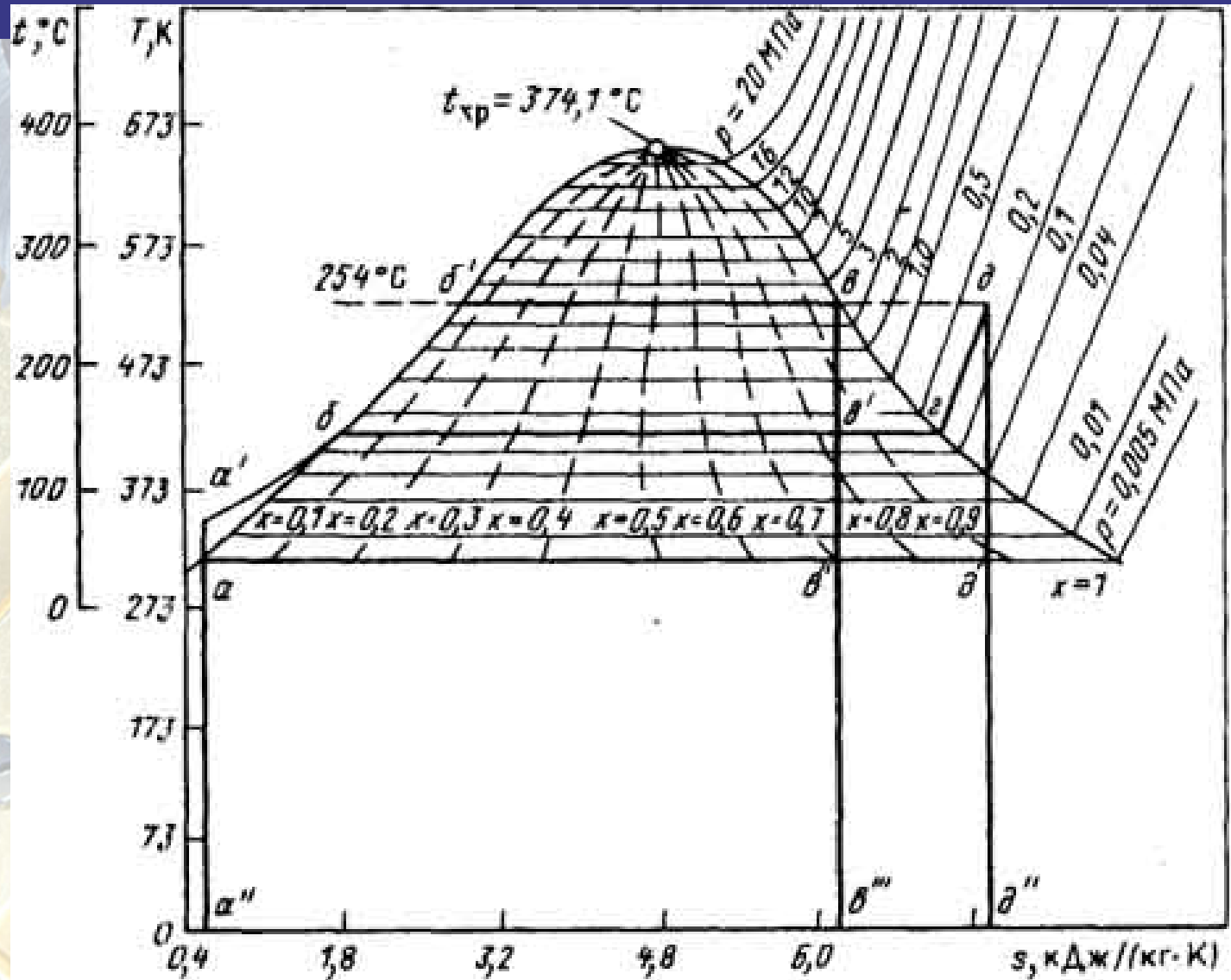
Следствия перехода к перегретому пару

- ❖ выше термический КПД цикла, чем на насыщенном паре при одинаковом p_0
- ❖ облегчение конструирования паровой турбины
- ❖ удешевление всего оборудования



Перегрев пара всегда повышает тепловую экономичность, если сопоставлять его работу с насыщенным паром **того же давления**

Сопоставление цикла Ренкина на насыщенном и перегретом паре





При одинаковом значении начальной температуры

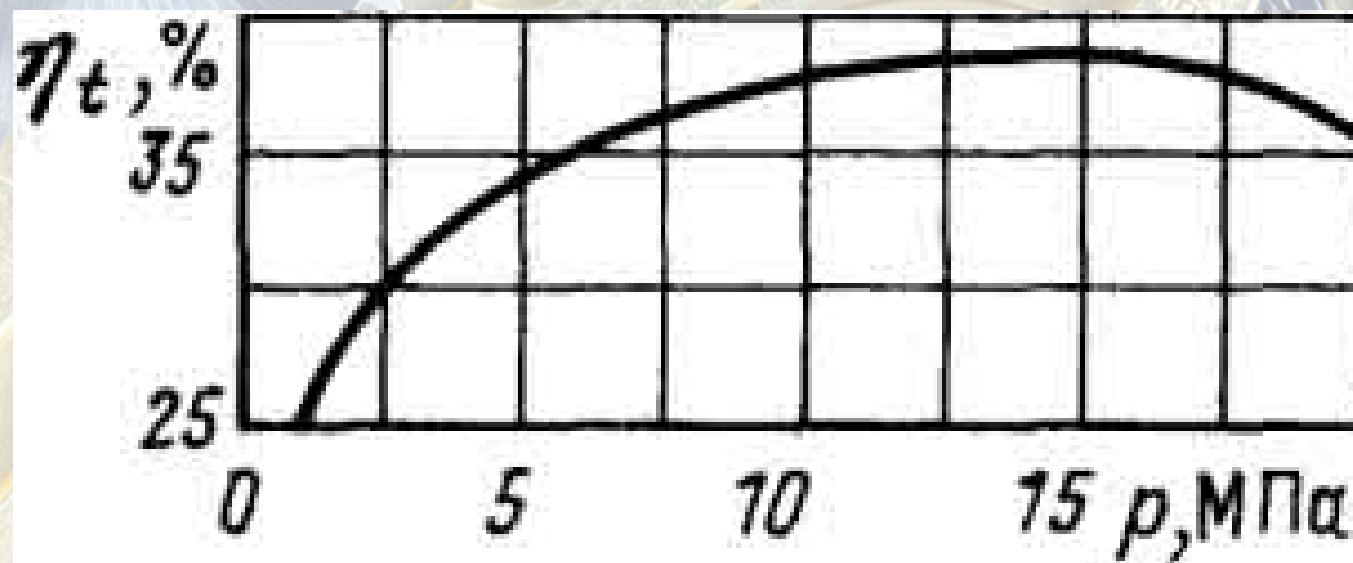
насыщенный пар оказывается более выгодным



По технико-экономическим условиям конструирования парогенератора

Перегрев пара для АЭС с водным
теплоносителем приводит к
необходимости снижения p_0

Начальное давление пара в ПТУ АЭС



Термический КПД для ПТУ на насыщенном паре в зависимости от начального давления

Значения начального давления пара в ПТУ АЭС

- ❖ Одноконтурные АЭС – 6,4 МПа
- ❖ Двухконтурные АЭС – 4,3 и 5,9 МПа


значения начальной температуры:

- ❖ 280 °С
- ❖ 254,9 °С и 274,3 °С



Высокая влажность пара в конце процесса расширения

ПТУ насыщенного пара не могут
использовать цикл Ренкина в его
исходном виде



Промежуточная сепарация и промежуточный перегрев пара на АЭС

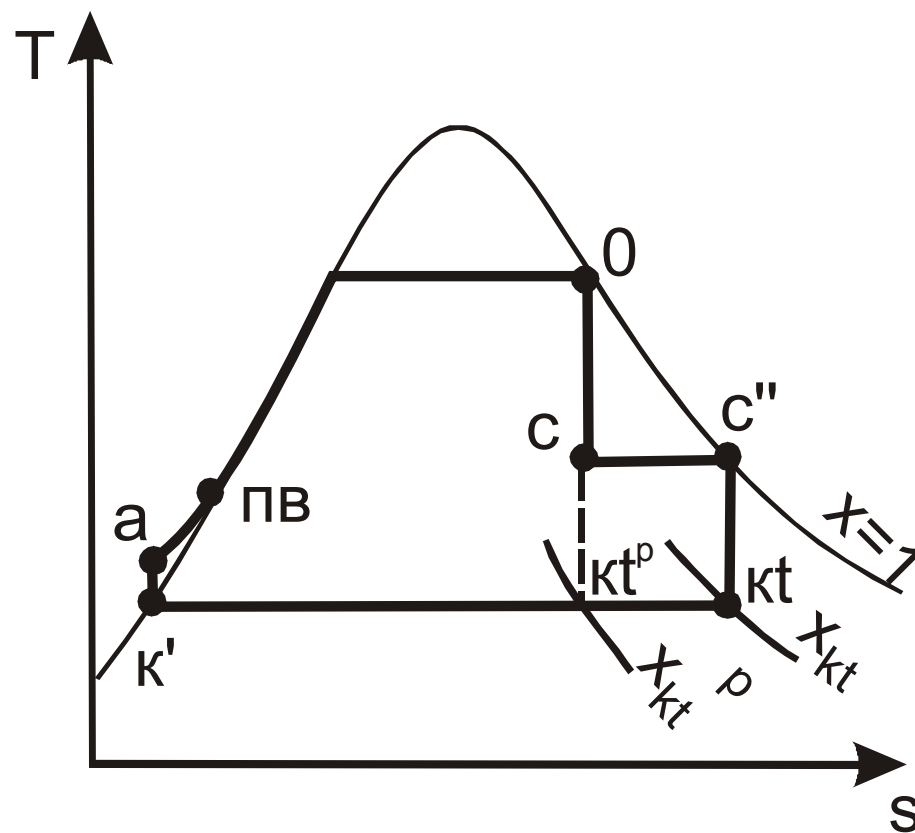
Идеальный цикл ПТУ АЭС с водным теплоносителем включает в себя как минимум промежуточную сепарацию



Промежуточная сепарация

Пар, достигший в процессе расширения предельно допустимых значений влажности, отводится в сепаратор и осушается в нем при постоянном давлении и температуре

Цикл с промежуточной сепарацией пара





При введении сепарации

возрастают

- ❖ полезная работа
- ❖ КПД цикла на 2 – 3,5 %



При $p_0 > 4$ МПа

влажность пара в допустимых пределах можно поддержать за счет

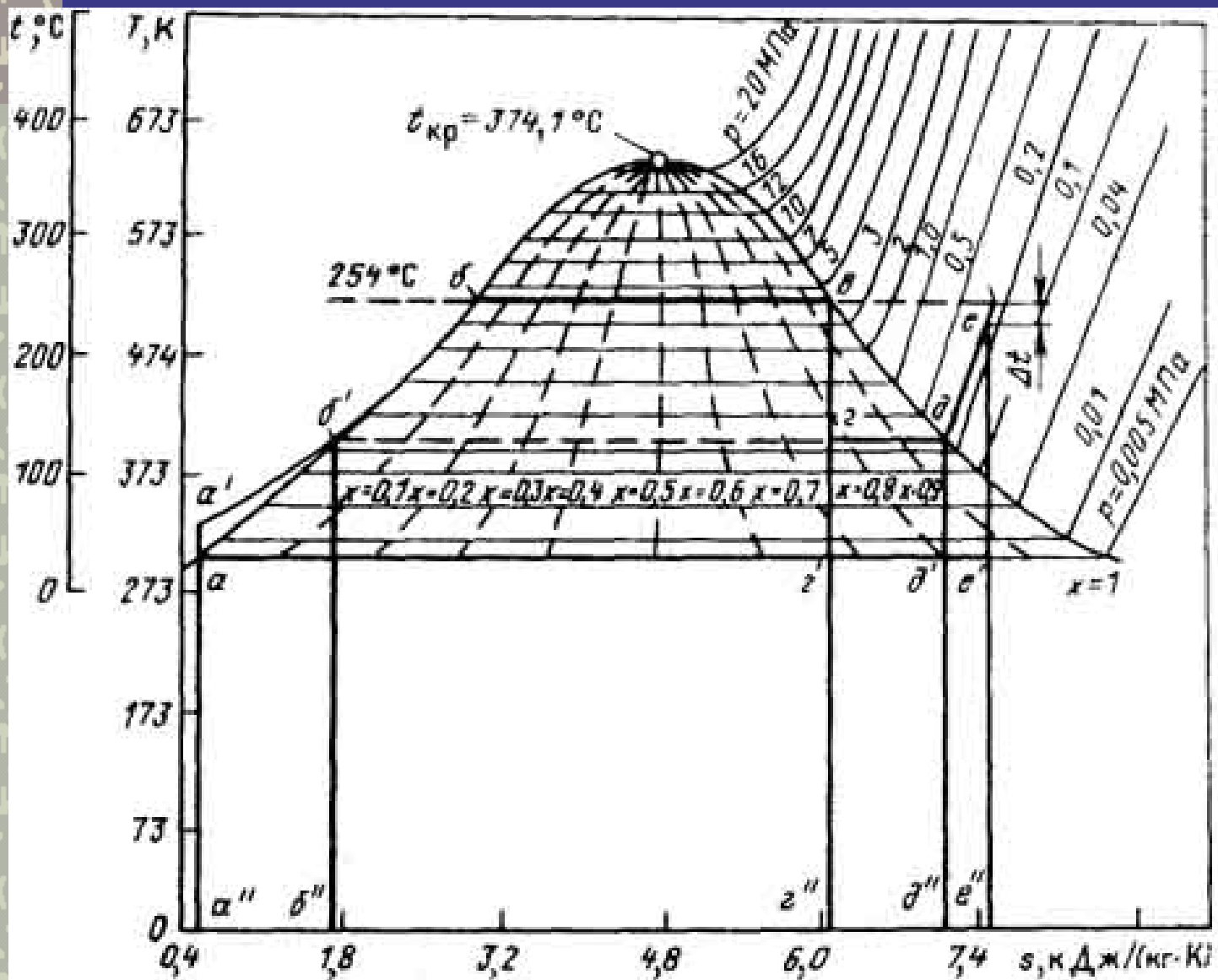
- ✚ двухкратной сепарации
- ✚ сепарации и промежуточного перегрева пара

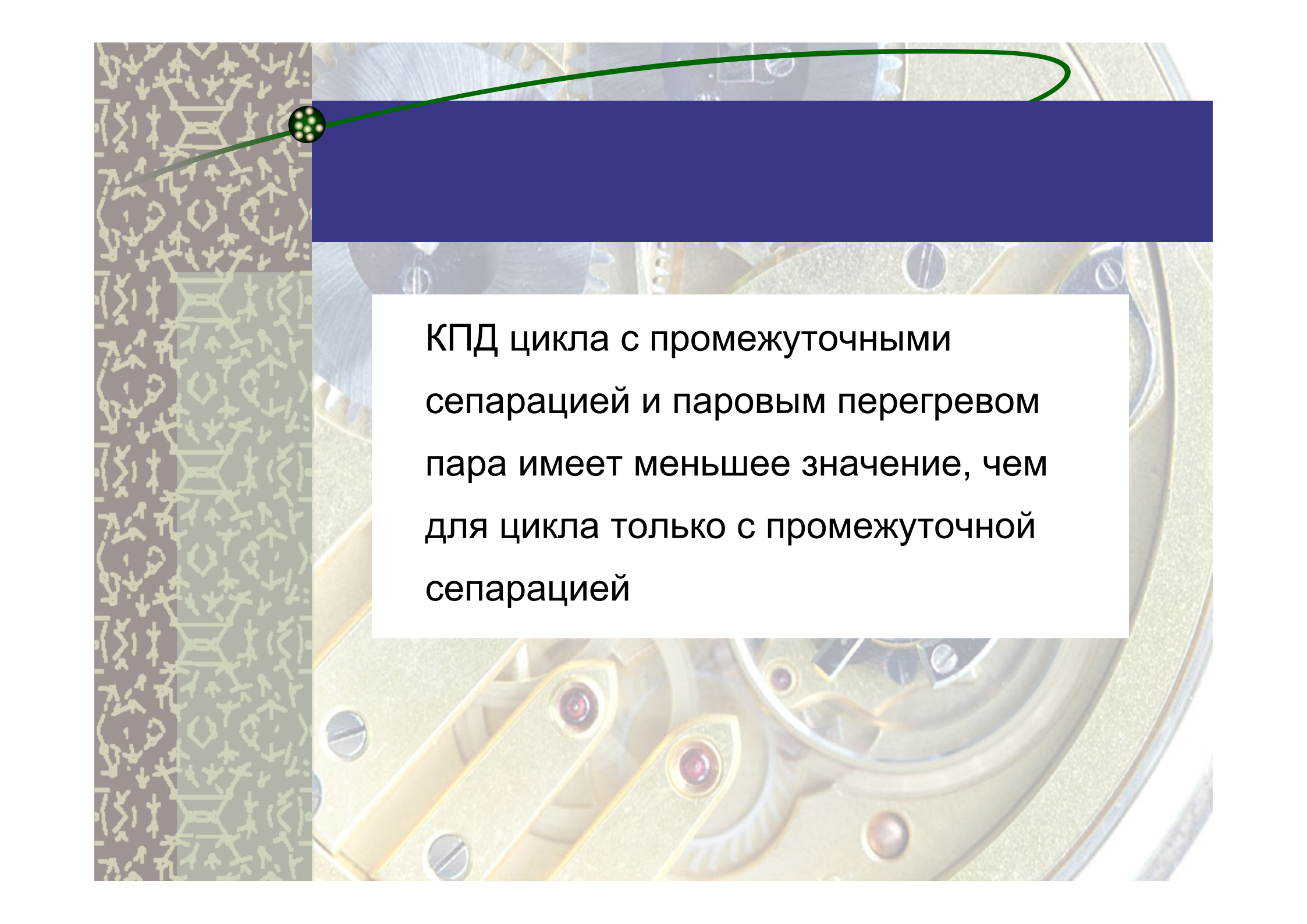


Промежуточный пароперегреватель

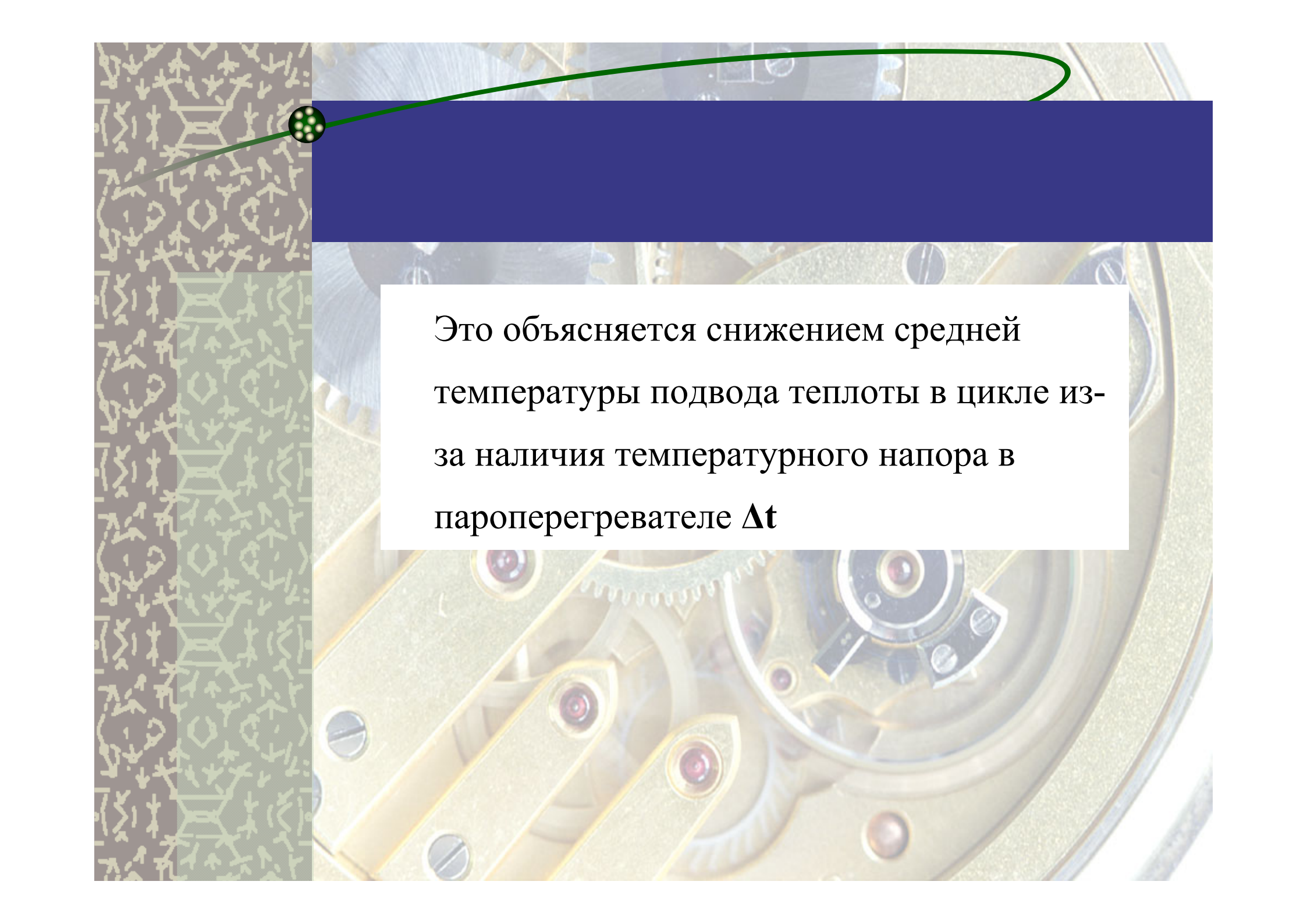
поверхностный теплообменник для перегрева пара после сепарации за счет теплоты конденсации части свежего пара

Цикл насыщенного пара с промежуточной сепарацией промежуточным перегревом

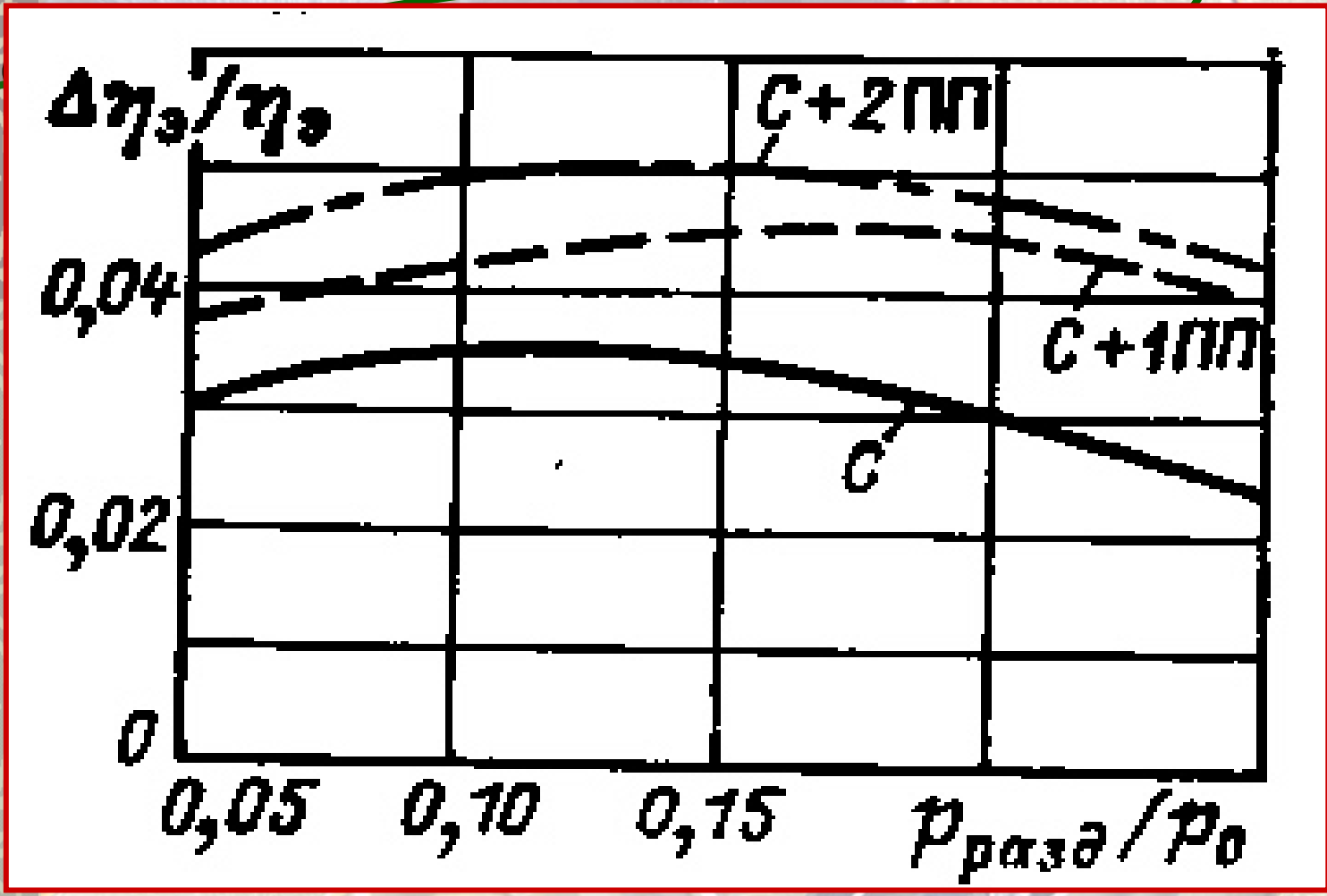


The background of the slide is a composite image. On the left side, there is a vertical strip showing a technical diagram of a steam cycle with various components and arrows indicating flow. On the right side, there is a close-up photograph of a mechanical watch movement, showing gears, levers, and jewels. A dark blue horizontal bar is positioned across the top of the slide, and a green curved line with a circular end containing five small green dots is located in the upper left corner.

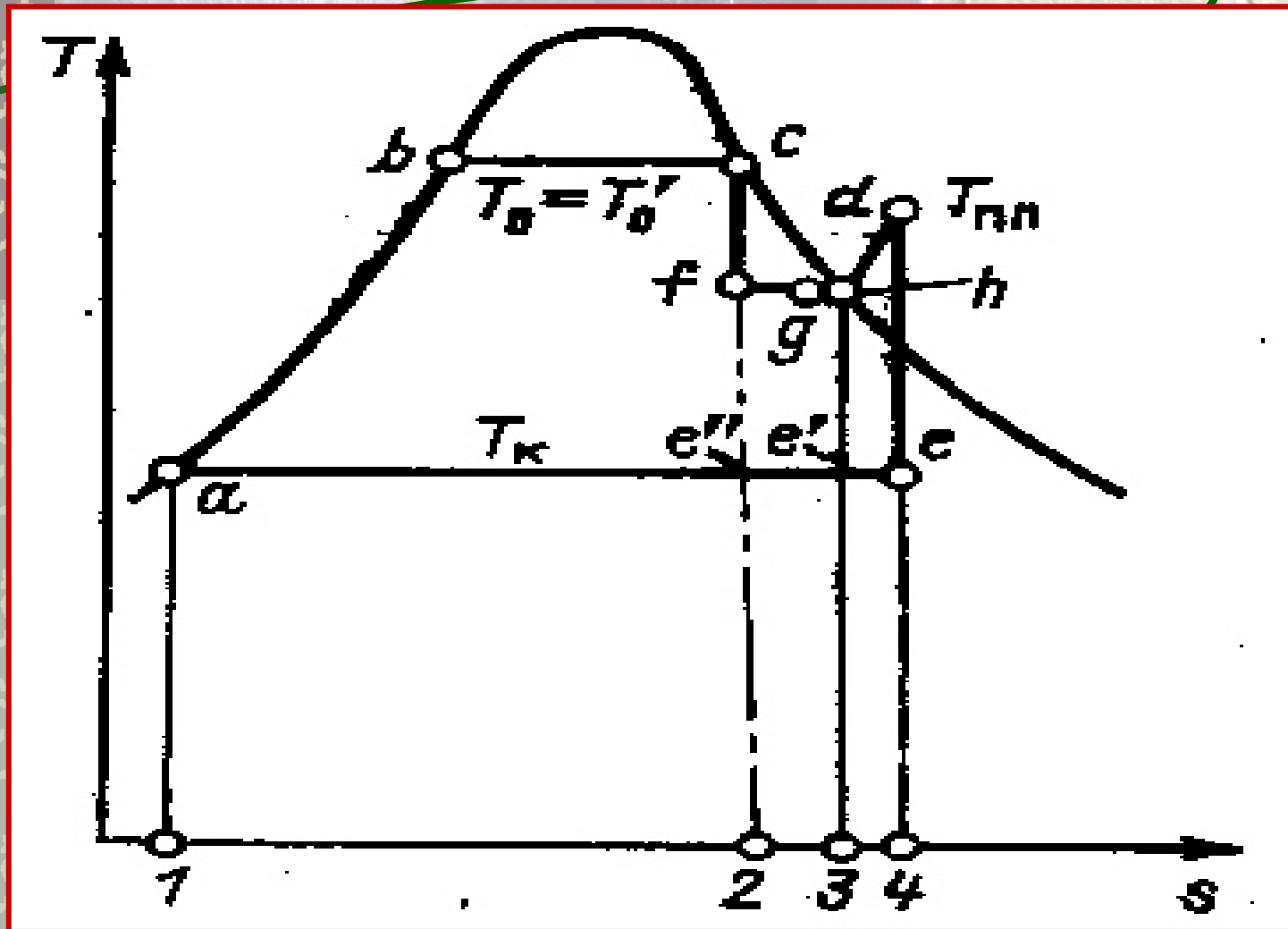
КПД цикла с промежуточными
сепарацией и паровым перегревом
пара имеет меньшее значение, чем
для цикла только с промежуточной
сепарацией

The background of the slide features a detailed close-up of a mechanical watch movement, showing various gears, levers, and jewels. A green line starts from a circular icon on the left, which contains several small green dots, and curves across the top of the slide. The text is centered in a white box.

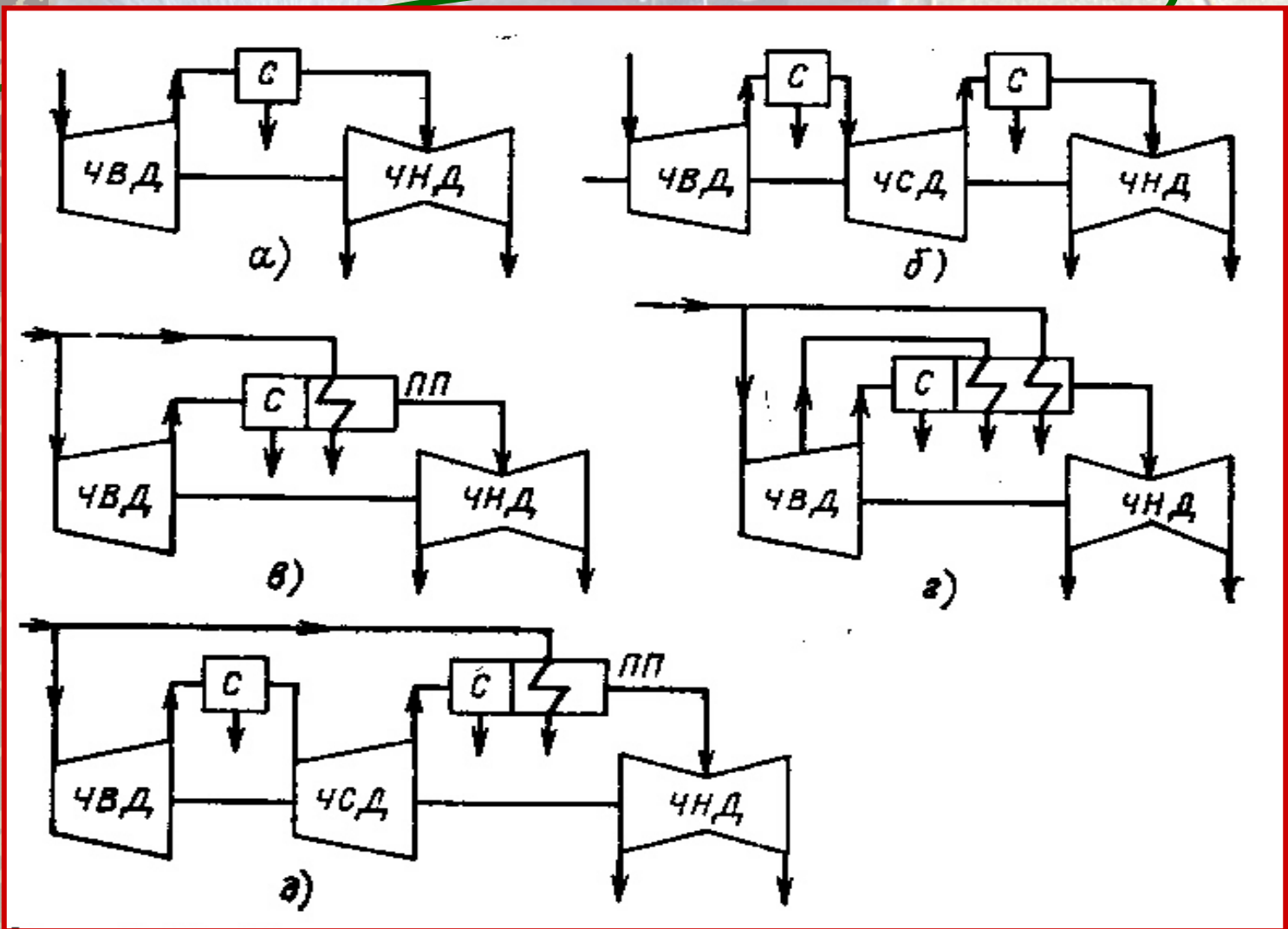
Это объясняется снижением средней температуры подвода теплоты в цикле из-за наличия температурного напора в пароперегревателе Δt



Влияние разделительного давления на КПД турбинной установки



Теоретический цикл турбинной установки насыщенного пара в Ts - диаграмме



Внешняя сепарация и промперегрев пара в турбинных установках насыщенного пара

**Процесс
расширения
пара в турбинах
в
h-s - диаграмме**

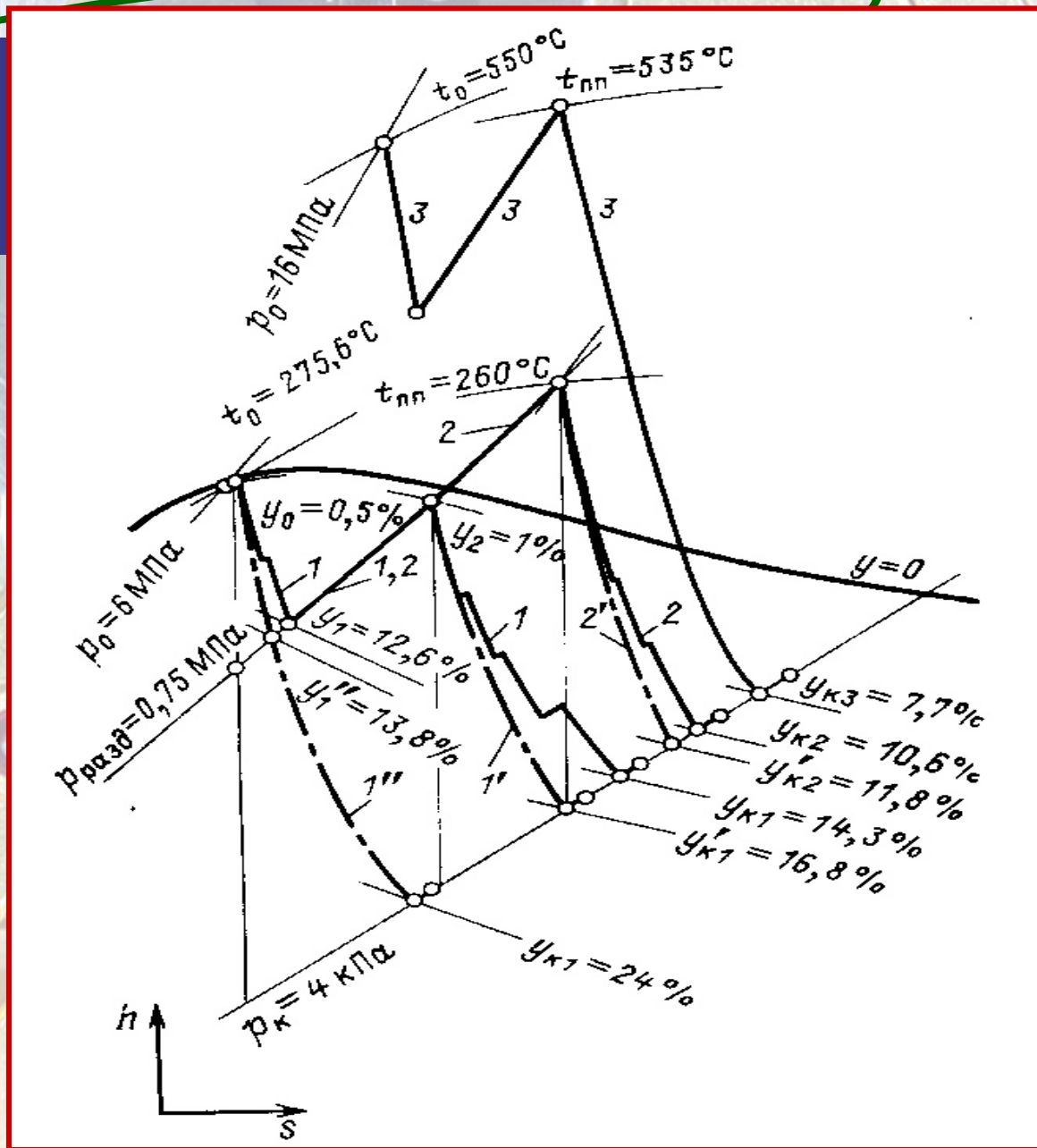


Схема ПТУ с СПП

