



# АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Тема. **Режимы работы АЭС**

# Особенности режимов работы оборудования на АЭС

---

- Наличие ионизирующего излучения
- Принципиальная возможность цепной реакции
- Наличие остаточных тепловыделений

# Классификация режимов работы АЭС

<b>Штатные режимы</b>	предусмотрены инструкциями по эксплуатации
<b>Нештатные режимы</b>	связаны с единичными отказами оборудования и систем
<b>Аварийные режимы</b>	при крупных отказах оборудования, систем, автоматики и ошибках персонала

## Ситуации, вызывающие аварийные режимы:

---

- незапланированное изменение  $\rho$
- резкое изменение расхода т/н через а.з.
- появление течей
- полное обесточивание станции
- нарушение герметичности ТВЭЛОВ сверх нормируемых величин
- повреждение главных паропроводов
- непредвиденные сбросы и набросы нагрузки

## Режимы нормальной эксплуатации включают:

---

- *стационарные* (установившиеся) режимы  
( $a_1 = \text{const}$ ,  $a_2 = \text{const}$  и т.д.)
- *нестационарные* (динамические) режимы  
( $a_1 = f(\tau)$ ,  $a_2 = f(\tau)$ , и т.д.)

## Динамические режимы связаны с:

---

- пусками
- остановами
- изменениями мощности
- аварийными ситуациями

## Переходные режимы с точки зрения оператора подразделяются на:

---

- управляемые
- относительно управляемые
- неуправляемые

# Классификация режимов по уровню мощности и параметров

---

- номинальный режим
- **не**номинальные режимы

*Номинальный* - режим,  
*соответствующий наиболее высокой*  
*экономичности и безопасности*

## Допустимое количество изменений нагрузки за весь срок эксплуатации энергоблоков АЭС

	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	РБМК-1000
Остановка ЯППУ с расхолаживанием	300	300	300
Пуск ЯППУ из холодного состояния	300	300	300-500
Пуск ЯППУ из горячего состояния	1500	5000	2500
Ступенчатое изменение нагрузки ( $\pm 20\%$ )	$5 \cdot 10^4$		



# **РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР**

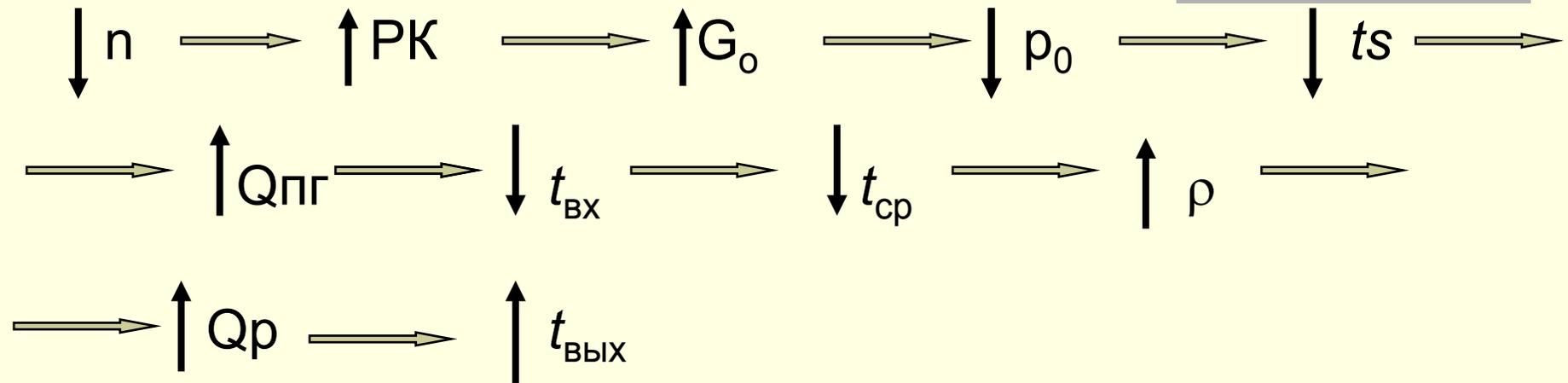
# РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

---

*Стационарная работа АЭС на мощностях ниже  
номинальной...*

- не нарушает условий безопасности*
- но приводит к снижению экономичности*

# Эффект положительного самовыравнивания реактора ВВЭР



- 
- Регулирование реактора существенно уменьшает статические и особенно динамические отклонения давлений и температур в обоих контурах энергоблока

# РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

---

Мощность реактора

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})$$

# Расчет программы регулирования энергоблока с ВВЭР

- Мощность реактора

$$Q_p = G_{\text{ТН}} \cdot c_p \cdot (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})$$

- Мощность ПГ

$$Q_{\text{ПГ}} = G_{\text{ПГ}} \cdot (h_0 - h_{\text{ПВ}})$$

$$Q_{\text{ПГ}} = K \cdot \Delta t$$

# Основные программы регулирования мощности АЭС с ВВЭР

---

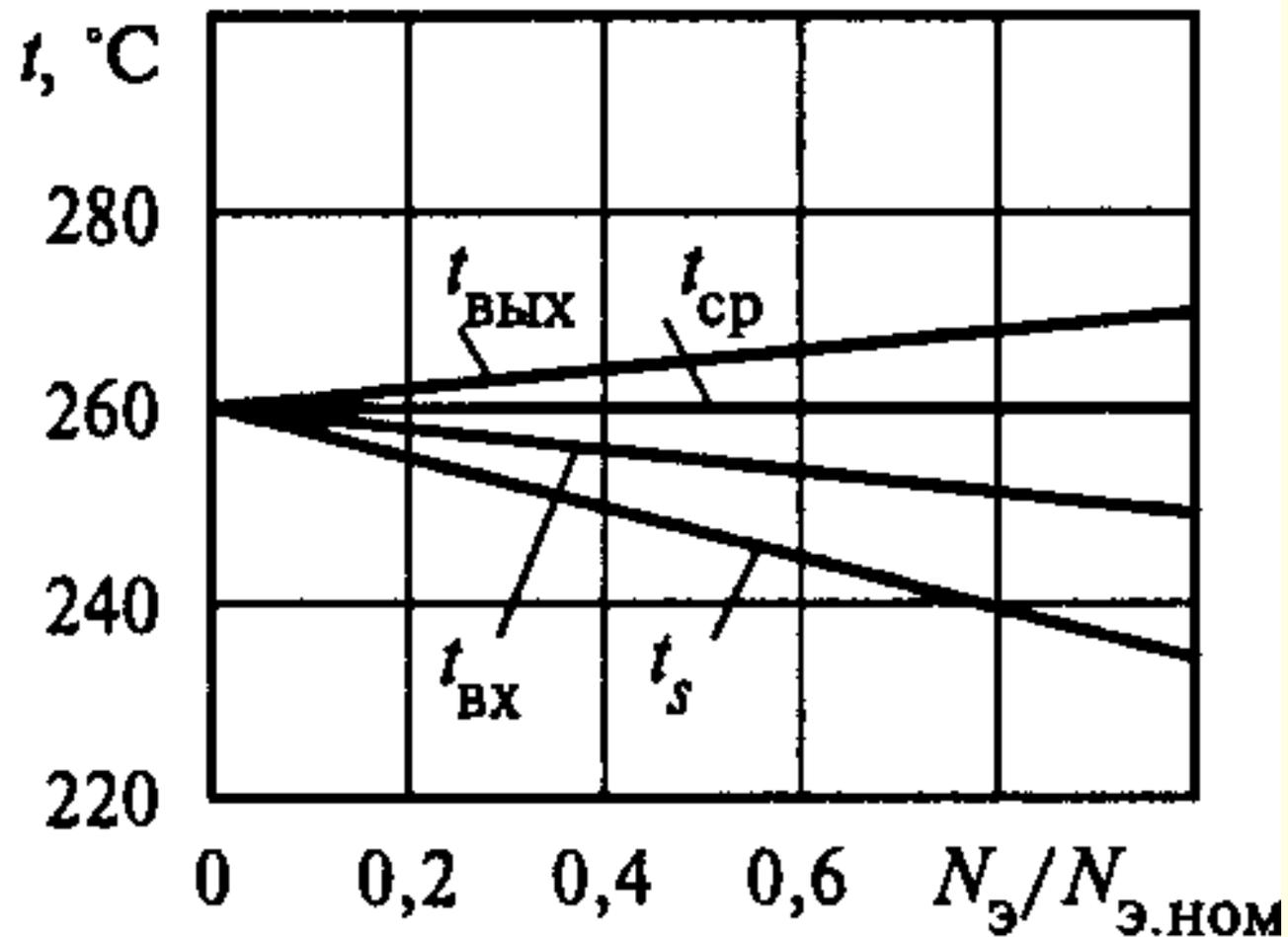
- $t_{\text{ср}} = \text{const}$
- $P_0 = \text{const}$
- компромиссная программа
- программа «скользящего давления»

# Выбор программы регулирования

---

- влияет на характеристики основного оборудования
- представляет собой сложную технико-экономическую задачу

## Программа $t_{cp} = \text{const}$



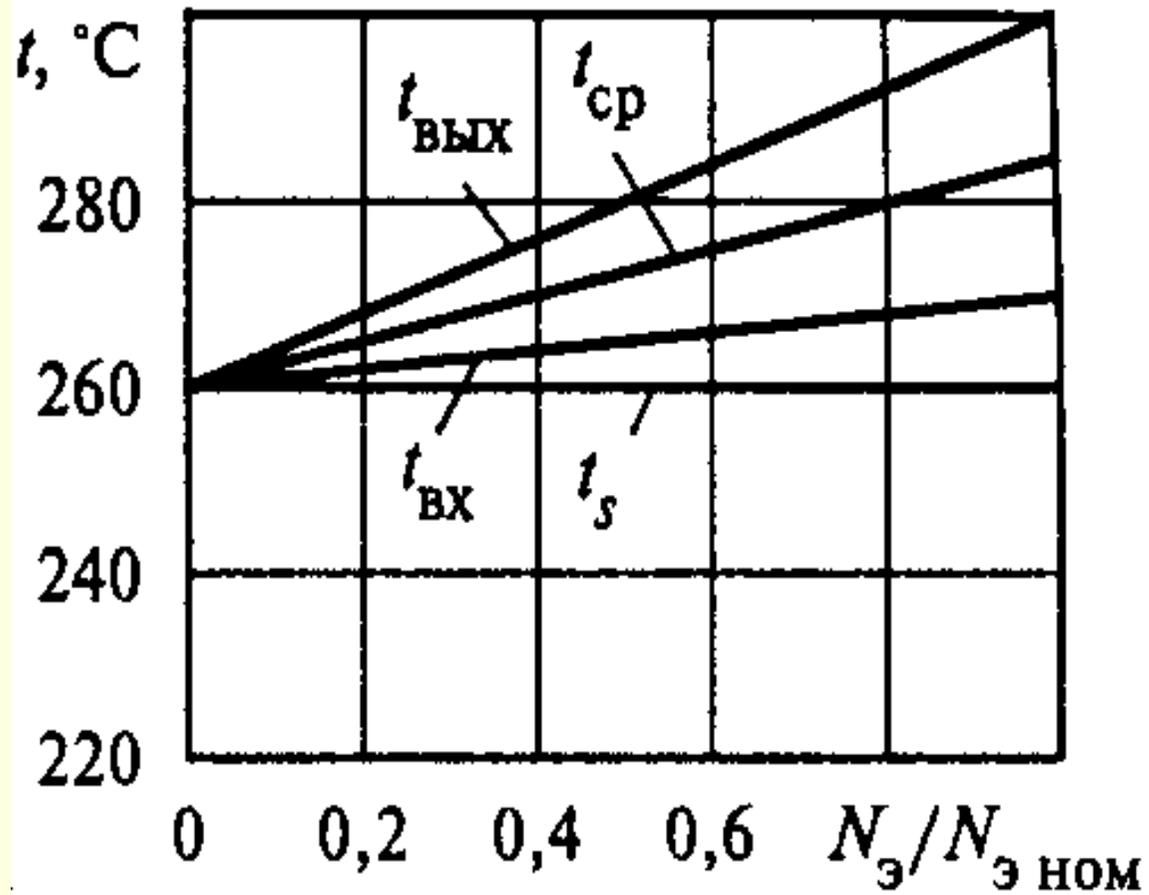
## Достоинства и недостатки программы $t_{CP} = \text{const}$

- Минимальное воздействие регулирующих органов при переходных процессах
- Максимальное использование свойств саморегулируемости
- Постоянство объема тепло-носителя

- Значительное изменение давления при переходе на новый уровень мощности
- Необходимость изготовления «утяжеленных» ПГ

*Эта программа применялась на 1-ом энергоблоке НВАЭС*

## Программа $p_0 = \text{const}$



## Достоинства и недостатки программы $P_0 = \text{const}$

- Облегчение температурных условий 2-го контура при сниженных нагрузках
- Использование ПГ минимальной стоимости

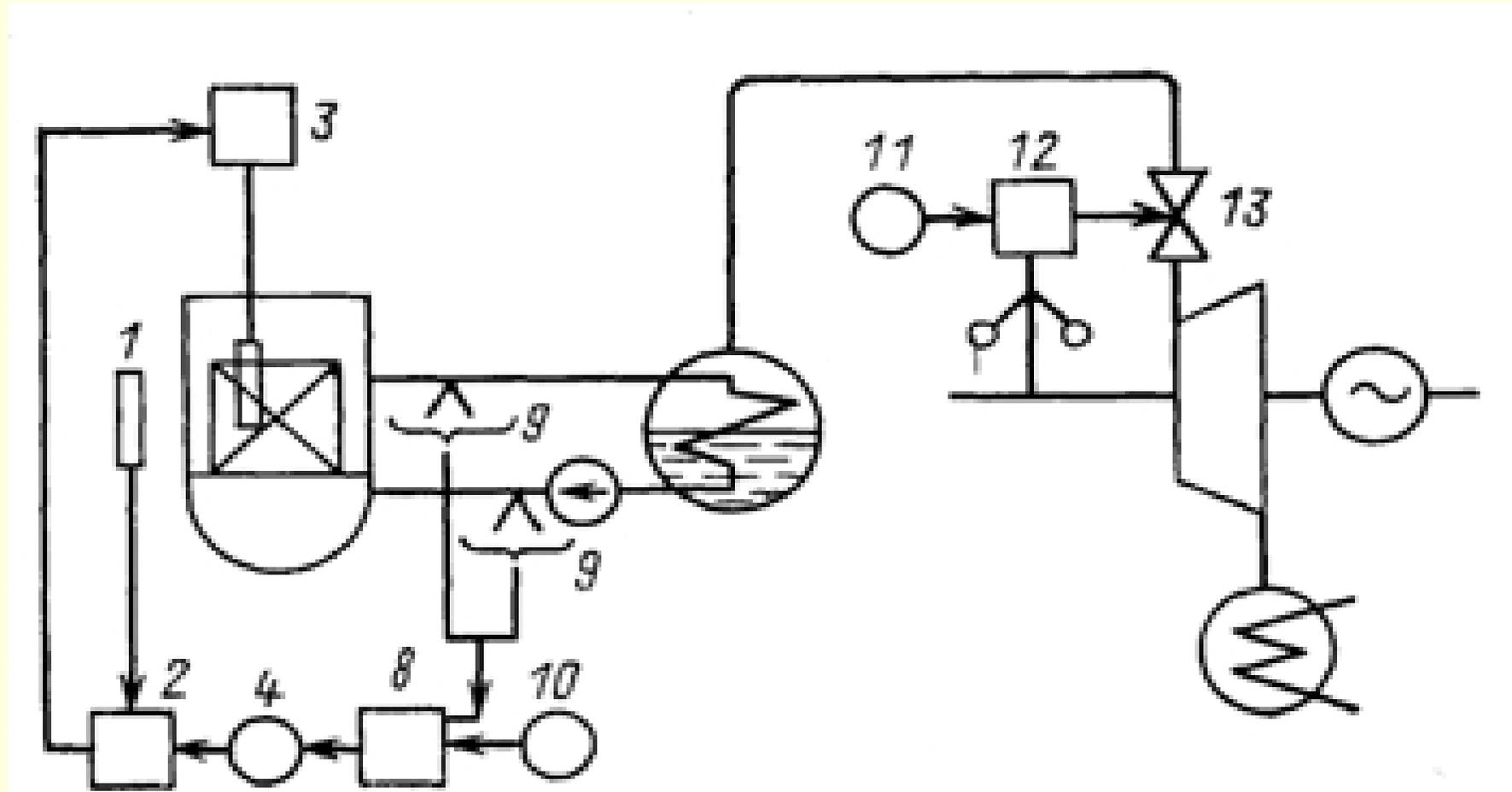
- Изменение реактивности вследствие изменения средней температуры теплоносителя
- Значительное изменение температурного состояния компонентов АЗ при переходе на новый уровень мощности
- Непостоянство объема теплоносителя

*применяется на энергоблоках ВВЭР-440 и ВВЭР-1000*

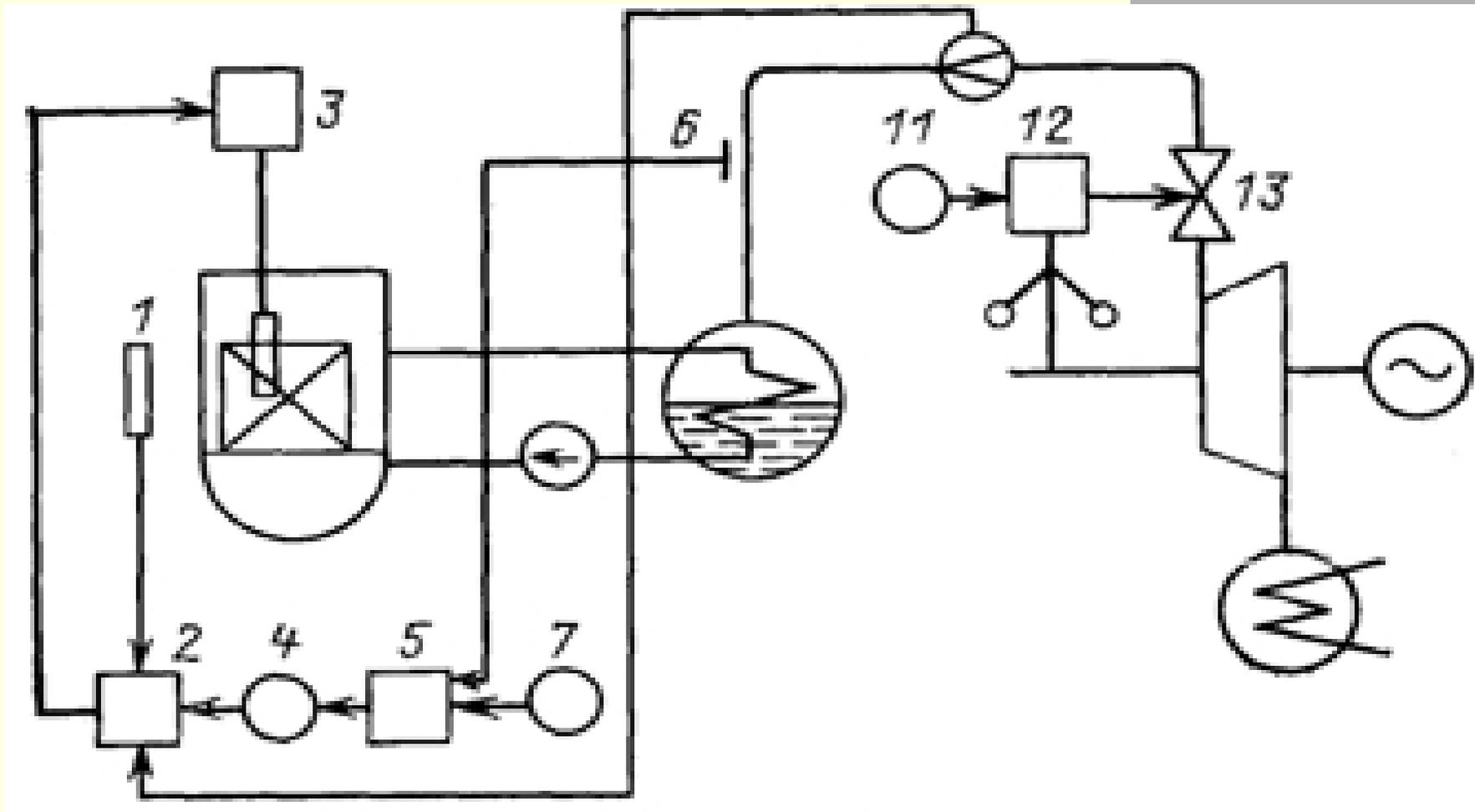
# СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА С ВВЭР

---

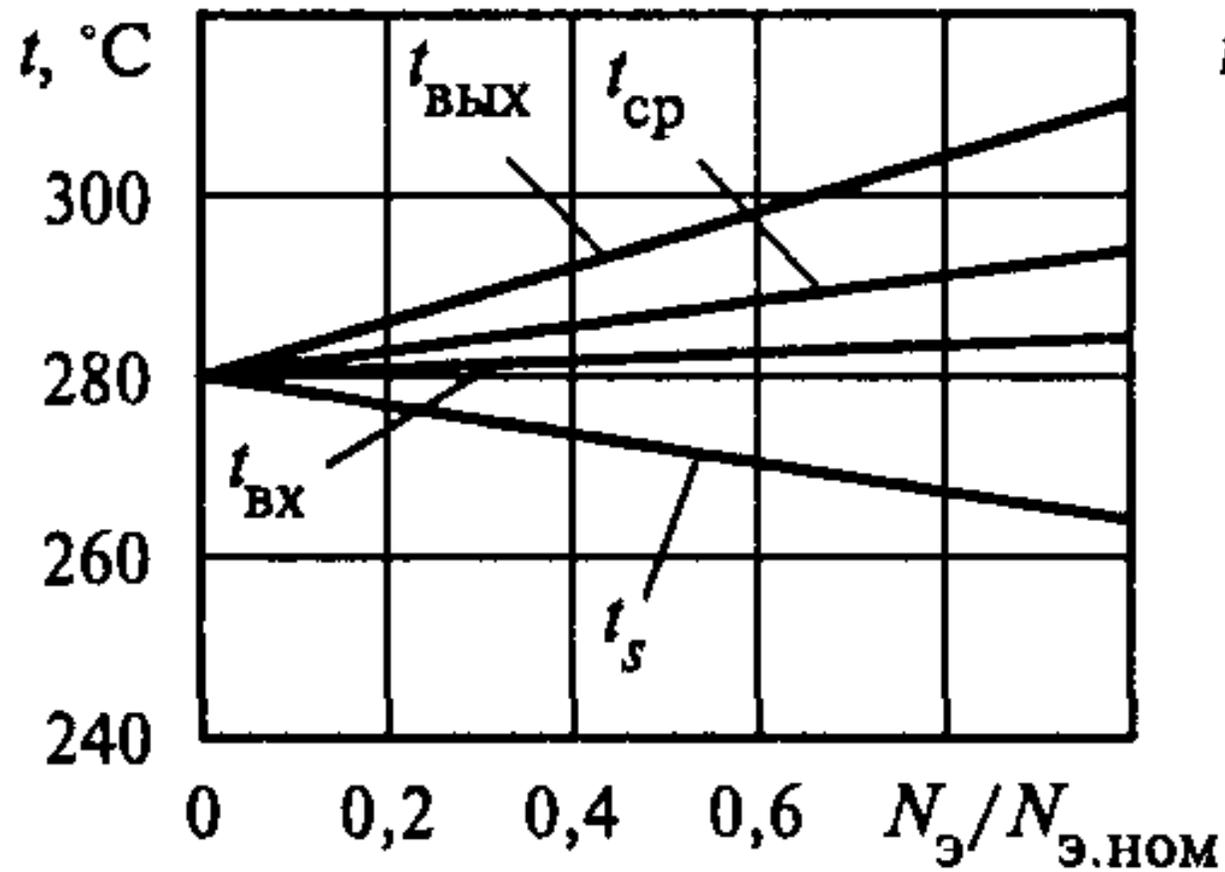
# Схема регулирования энергоблока с ВВЭР по программе $t_{cp} = const$



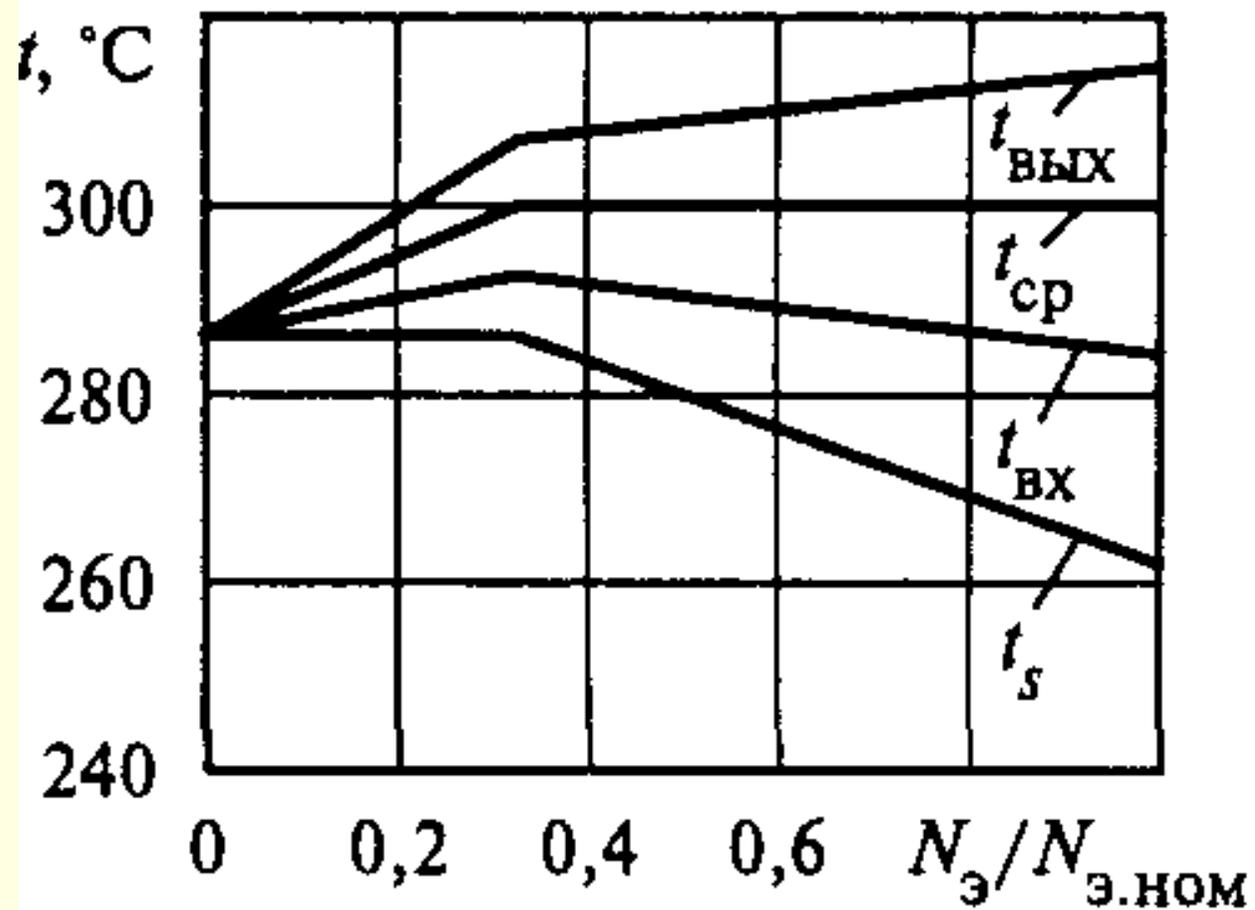
# Схема регулирования энергоблока с ВВЭР по программе $p_0 = \text{const}$



## Компромиссная программа



## Комбинированная программа

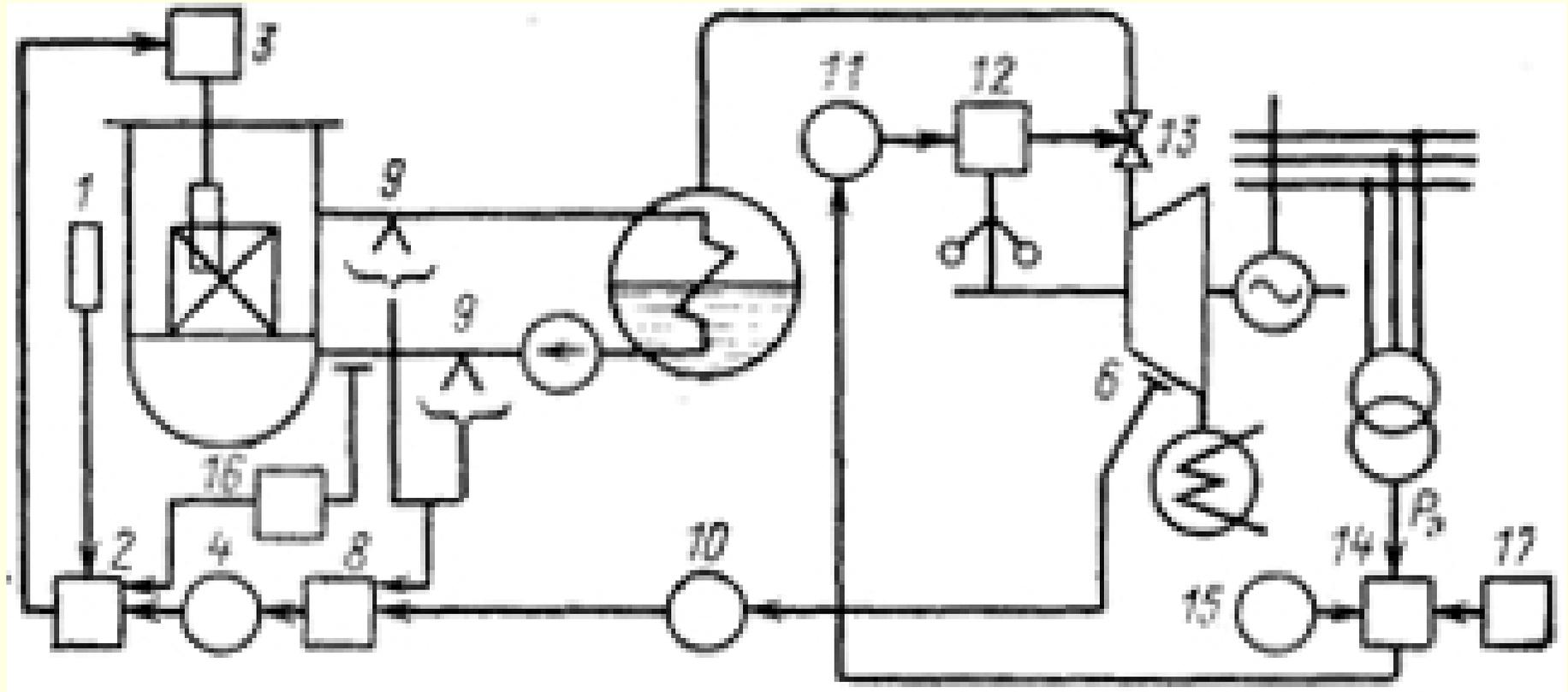


# Преимущество комбинированной программы

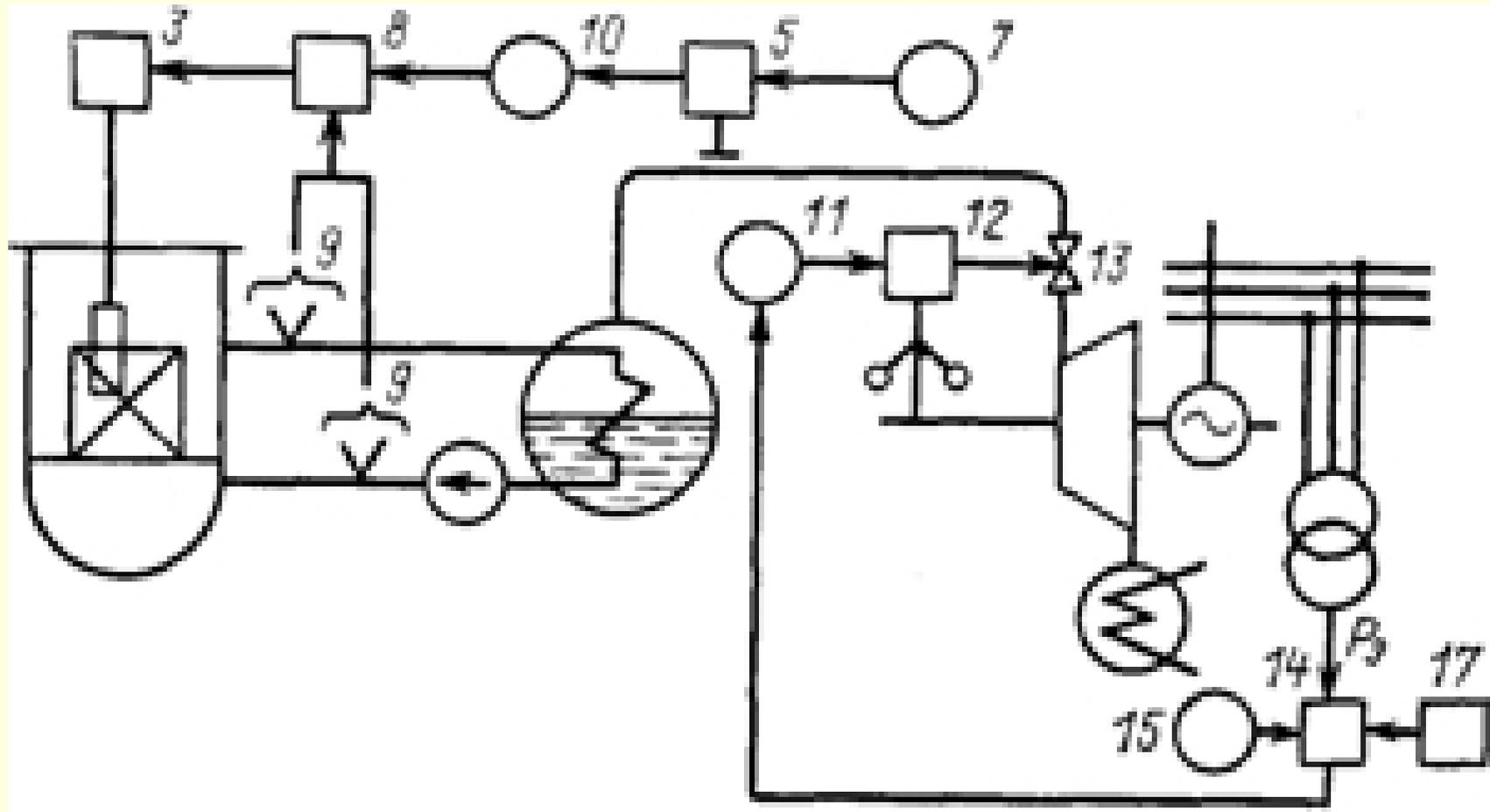
---

- при больших нагрузках - программа  $t_{cp} = \text{const}$
- в остальном диапазоне нагрузок - программа  $p_0 = \text{const}$

## Схема регулирования блока по компромиссной программе



# Схема регулирования блока по комбинированной программе



## Многофункциональная система регулирования энергоблока ВВЭР-440 АЭС "Ловииса"

---

Большую часть времени энергоблок участвует в:

- регулировании графика нагрузки в диапазоне (0,5 - 1,0)  $P_{\text{э}}^{\text{НОМ}}$  со средней скоростью (1-2) %  $P_{\text{э}}^{\text{НОМ}}$  в мин
- быстром регулировании частоты и перетоков активной мощности в диапазоне (0,8 - 1,0)  $P_{\text{э}}^{\text{НОМ}}$
- первичном регулировании частоты сети со степенью неравномерности 2 - 10 %

# Регуляторы мощности

---

- Реактор и турбина имеют независимые РМ
- Для блока принята программа регулирования  $p_0 = \text{const}$
- При  $Q_p = \text{const}$  регулятор поддерживает заданную нейтронную мощность по току ионизационных камер
- Мощность блока устанавливается регулятором, который получает задание от регулятора энергосистемы
- Непосредственно мощностью турбины на всех режимах работы управляет ЭГСР

# Регуляторы давления

---

- Заданное давление теплоносителя поддерживается РД КО
- Регулятор max давления управляет сбросом пара в конденсатор

# Регуляторы уровня

---

- задание регулятору уровня в КО зависит от средней температуры теплоносителя в первом контуре и вычисляется в специальном устройстве
- трехимпульсный регулятор уровня в ПГ получает сигналы по уровню в ПГ, расходам пара и воды

# Общевлочное регулирование

---

- Современные схемы управления АЭС предусматривают параллельное изменение мощности турбогенератора и ЯППУ
  - по отклонению частоты в энергосистеме или
  - по заданной мощности



# **РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ С РБМК**

# Сложности управления реактором

---

- реактор больших размеров
- РБМК работает в режиме непрерывных перегрузок топлива
- структура энерговыделения сложная
- пространственная нестабильность энерговыделения
- каналные реакторы имеют меньшее самовыравнивание

# Косвенный контроль параметров РБМК

---

- энерговыделения
- запаса до кризиса теплообмена в топливных кассетах
- температуры графитовой кладки в каждой ячейке реактора
- и т. п.

на основе оперативных расчетов, проводимых ЭВМ системы "Скала"

# Методы контроля энерговыделения

---

- измерения плотности нейтронного потока
- измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения

# Регулятор средней мощности реактора

---

- работает от ионизационных камер
- воздействует на приводы соответствующей группы регулирующих стержней

функционально выделены группы стержней,  
обеспечивающие

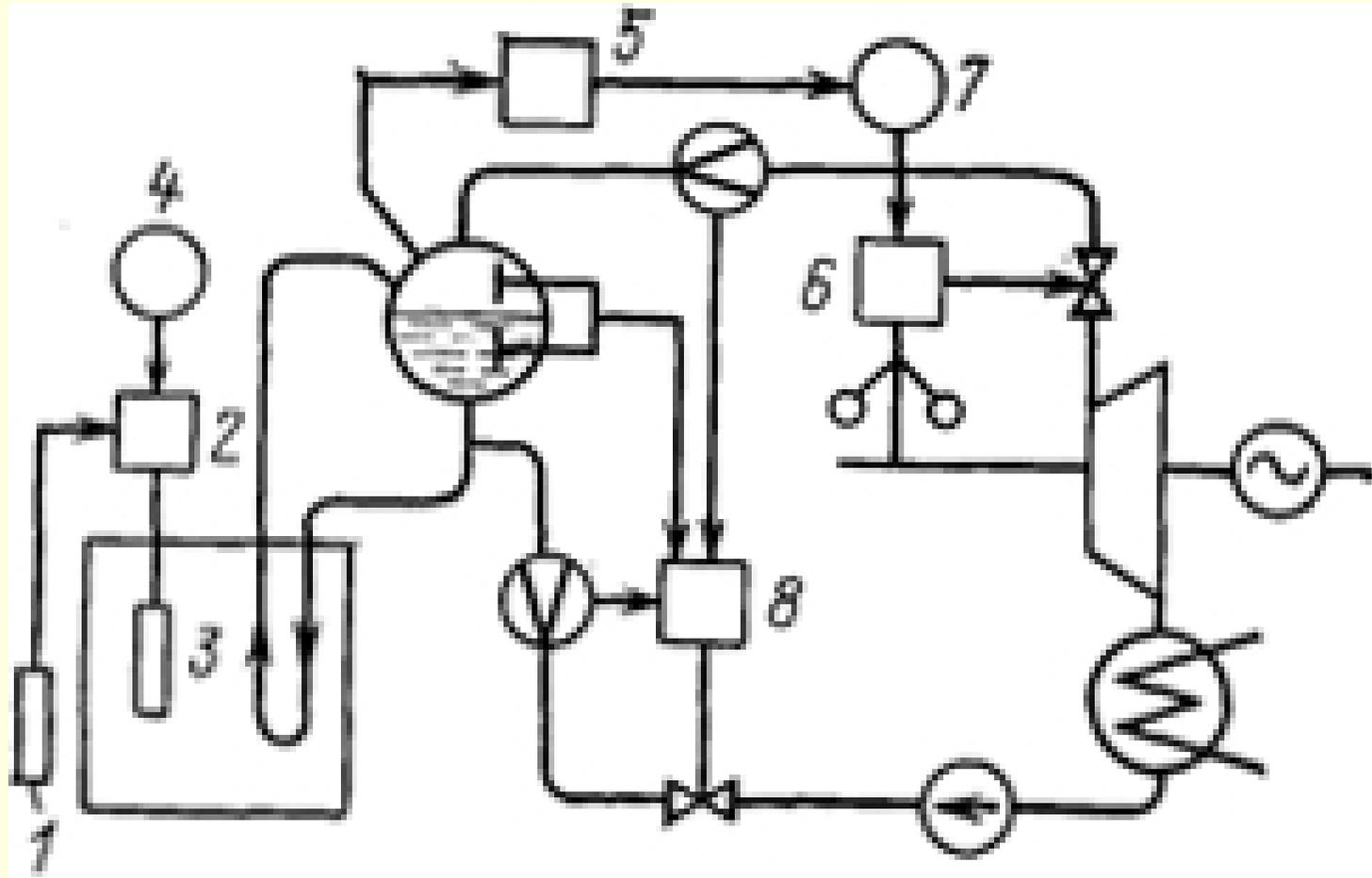
- регулирование объемного энерговыделения
- компенсацию эффектов
  - выгорания
  - отравления и т. п.

# Регулятор средней мощности реактора

---

- На уровне мощности **(0,0025 - 0,06)  $P_{\text{э}}^{\text{ном}}$**  - один РСМ
- В диапазоне **(0,06 - 1,0)  $P_{\text{э}}^{\text{ном}}$**  - два РСМ (1 - в работе, другой - в резерве)
  
- Регулятор сохраняет работоспособность при выходе из строя любого одного из четырех измерительных или исполнительных каналов

# Схема регулирования энергоблока с реактором РБМК





# **РЕГУЛИРОВАНИЕ БЛОКОВ АЭС С РБН**

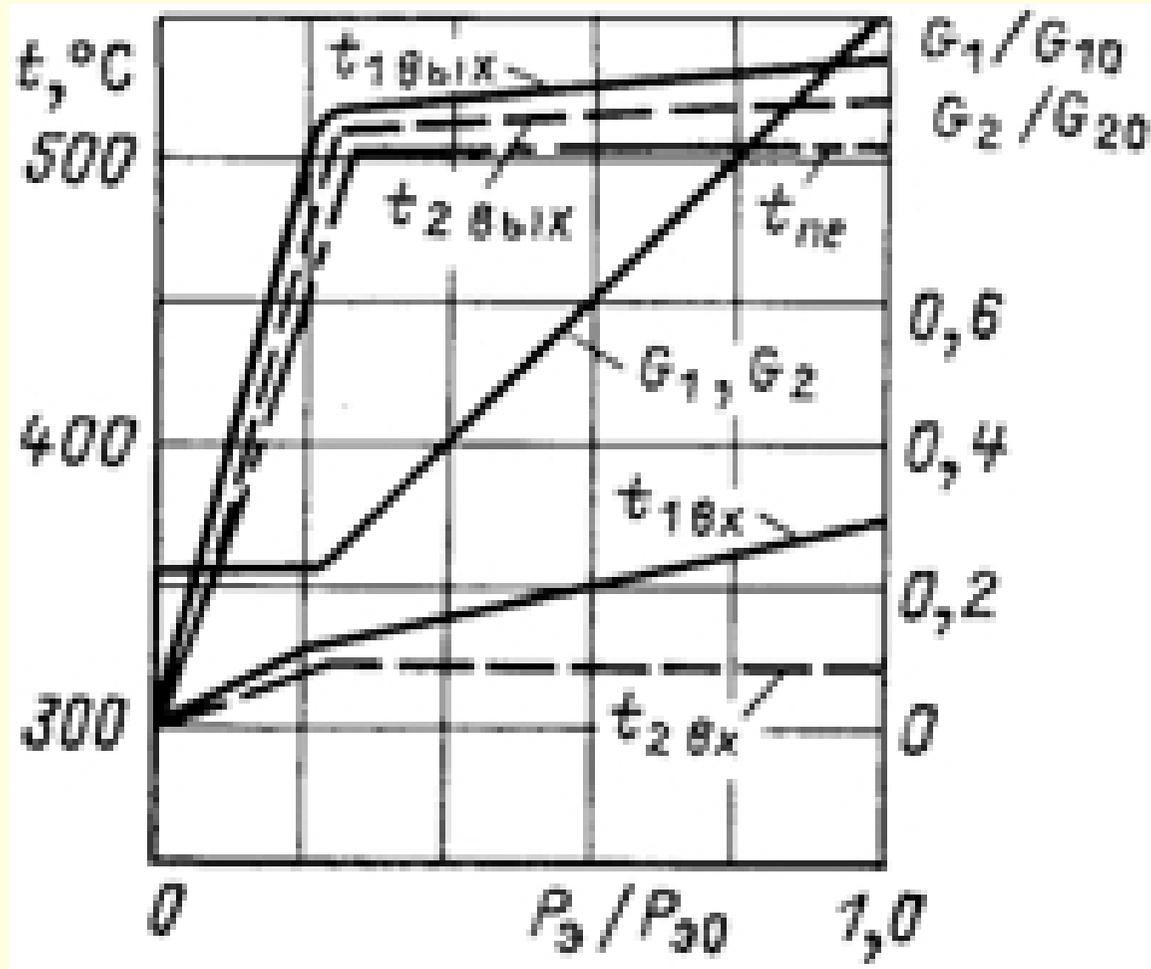
# РЕГУЛИРОВАНИЕ БЛОКОВ АЭС С РБН

---

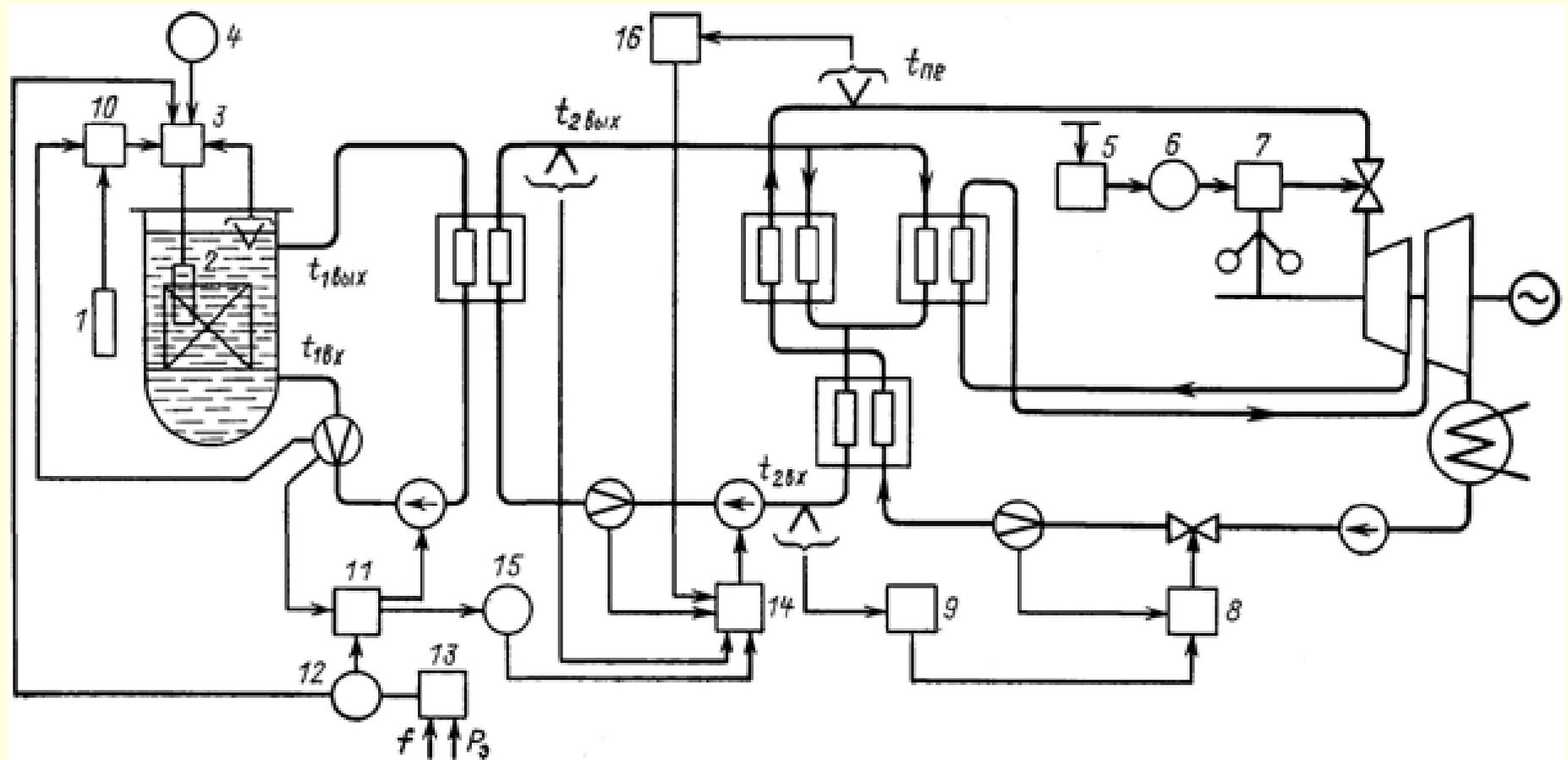
Особенности установок:

- наличие промежуточного контура
- большой подогрев теплоносителя в АЗ
- высокие параметры пара
- использование прямоточных парогенераторов

# Программа регулирования блока с РБН



# Схема регулирования блока с РБН



# Регулятор мощности реактора

---

получает импульсы

- по температуре теплоносителя на выходе из реактора
- через дифференциатор
  - по току ионизационной камеры
  - по расходу теплоносителя через реактор

# Регуляторы расхода теплоносителя первого контура

---

- по каждой петле свой регулятор
- задание устанавливается
  - общим задатчиком
  - либо
  - регулятором мощности блока по отклонениям частоты и мощности

## Регуляторы расхода теплоносителя второго контура

---

получают импульсы

- по расходу и температуре теплоносителя второго контура на выходе из теплообменника
- опережающий сигнал по расходу первого контура через динамическую связь
- сигнал от корректирующего регулятора температуры перегретого пара

# Регулирование подачи питательной воды в ПГ

---

- регулятором расхода
- задание изменяется корректирующим регулятором
- поддерживается постоянная температура теплоносителя на выходе из ПГ

# Регулирование давления пара перед турбиной

---

- регулятор давления "до себя" воздействует через МУТ на регулирующие клапаны турбины