

# Применение компьютерных тренажеров АЭС для подготовки специалистов в высшей школе

Минск, Белоруссия,  
24 – 28 Мая 2010

# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-А3»

Чернов Е.В., Выговский С.Б.

[chernov.e@inbox.ru](mailto:chernov.e@inbox.ru), [vigovskii@mail.ru](mailto:vigovskii@mail.ru)

Москва, МИФИ, Кафедра № 2  
«Автоматики»

# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-А3»

## ПЛАН СЕМИНАРА ПО «КОС-А3»:

1. Характеристика тренажера и инструментальных средств поддержки его работы. Перечень решаемых на тренажере задач.
2. Демонстрация функциональных возможностей тренажера и решаемых на тренажере задач.
3. Практические занятия на тренажере.

# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-АЗ»

## ЦЕЛИ СЕМИНАРА ПО «КОС-АЗ»:

- Знакомство со средствами и объёмом моделирования РУ ВВЭР-1000 в тренажёре «КОС-АЗ».
- Знакомство со средствами отображения результатов моделирования и управлением тренажером «КОС-АЗ» в диалоговом режиме в реальном масштабе времени.
- Закрепление полученных знаний и навыков на примере решения ряда учебных задач.
- Знакомство со средствами обработки и анализа результатов выполнения учебных задач на тренажере «КОС-АЗ».

# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-А3»

## Часть 1.

Характеристика тренажера и  
инструментальных средств поддержки  
его работы. Перечень решаемых на  
тренажере задач.

# Содержание части 1

1. Основные цели и задачи, характеристика тренажера.
2. АЭС с ВВЭР-1000.
3. Состав и характеристика моделируемого оборудования.
4. Перечень моделируемых режимов и явлений.
5. Перечень и характеристика моделей, входящих в состав тренажера.
6. Инструментальные средства поддержки работы тренажера.
7. Характеристика решаемых на тренажёре задач.

# 1. Основные цели и задачи

- Данный тренажер является частью программы МАГАТЭ по использованию тренажеров ЯЭУ различных типов в целях образования и подготовки кадров.
- Цель данной программы состоит в предоставлении возможности получения знаний и опыта по управлению, отклику на возмущения и поведению в аварийных ситуациях водо-водяных реакторов различного типа.
- Для достижения данной цели МАГАТЭ поддерживает разработку компьютерных программ и учебных материалов, организует учебные курсы и семинары, распространяет документацию и компьютерные программы.
- Тренажер реактора ВВЭР-1000 «КОС-АЗ» является частью этой программы МАГАТЭ.

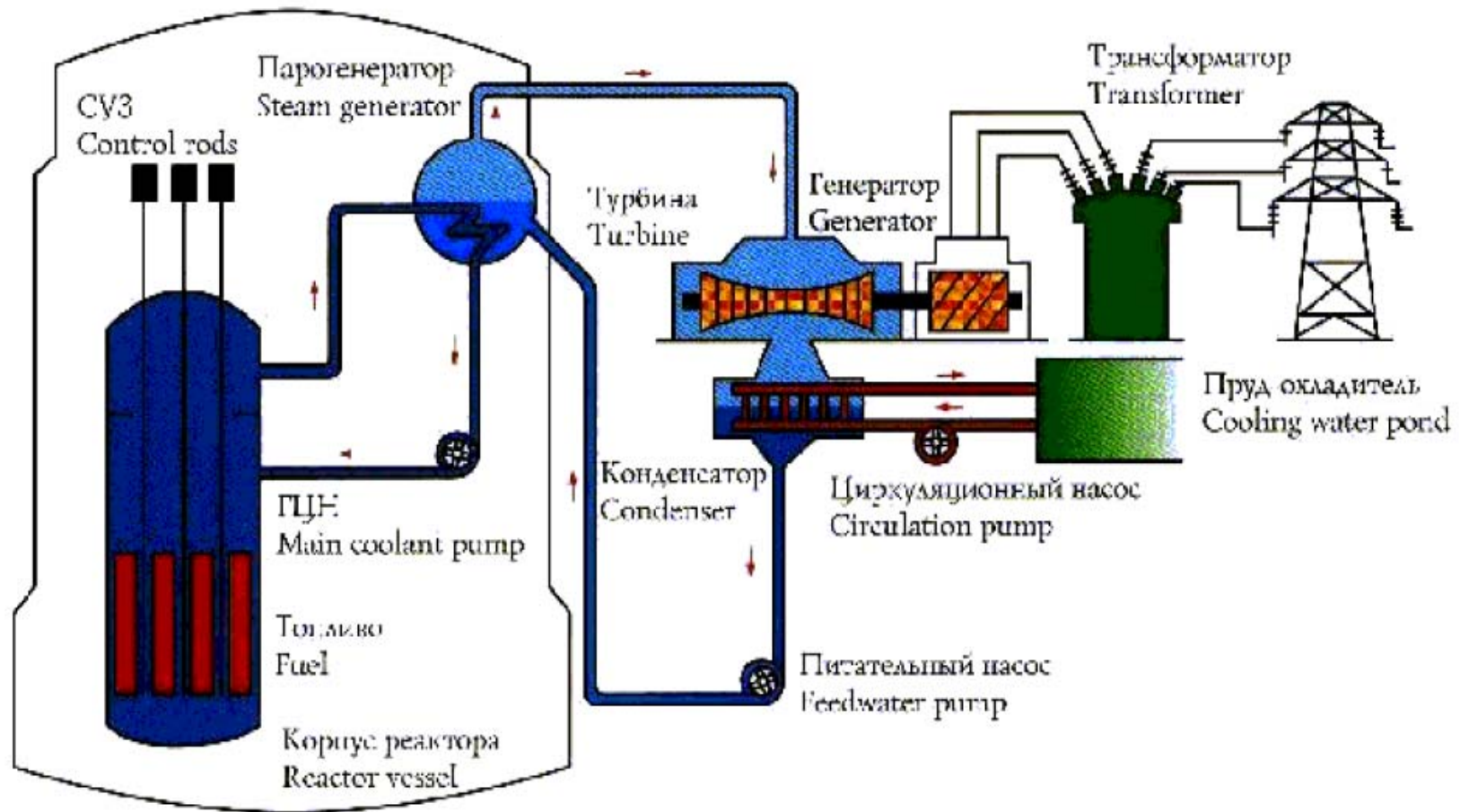
# Характеристика тренажера

- Компьютерный тренажер «КОС-АЗ» обеспечивает понимание конструкции и принципов управления реактором ВВЭР-1000.
- Тренажер может быть использован в качестве средства обучения базовым принципам работы РУ с ВВЭР-1000 для широкой категории учащихся.
- Тренажер может также использоваться как техническое средство для построения различных обучающих курсов по физике реакторов ВВЭР-1000.
- Применение тренажера ограничивается демонстрацией основ физики и общих принципов работы реактора ВВЭР-1000.
- Тренажер не предназначен для целей поддержки эксплуатации АЭС, анализа безопасности, лицензирования или подготовки операторов.



## 2. АЭС с реактором ВВЭР-1000

Отпуск электроэнергии потребителю  
Electricity to the consumer



# Принцип работы РУ АЭС с ВВЭР-1000

- Тепло производится в топливе активной зоны РУ в результате деления нейтронами ядер урана и через оболочку ТВЭЛ передаётся в теплоноситель первого контура.
- Теплоноситель первого контура отдаёт тепло во второй контур в теплообменнике (парогенераторе) и вновь поступает на вход реактора с помощью ГЦН.
- Теплоноситель второго контура превращается в пар в парогенераторе и поступает на вход турбины, соединённой с генератором электроэнергии.
- На выходе из турбины пар попадает в конденсатор, конденсируется и вновь подаётся на вход парогенератора с помощью ТПН.
- Для охлаждения конденсатора используется т.н. «третий контур» в виде градирни или пруда-охладителя, который передаёт оставшееся тепло в атмосферу.

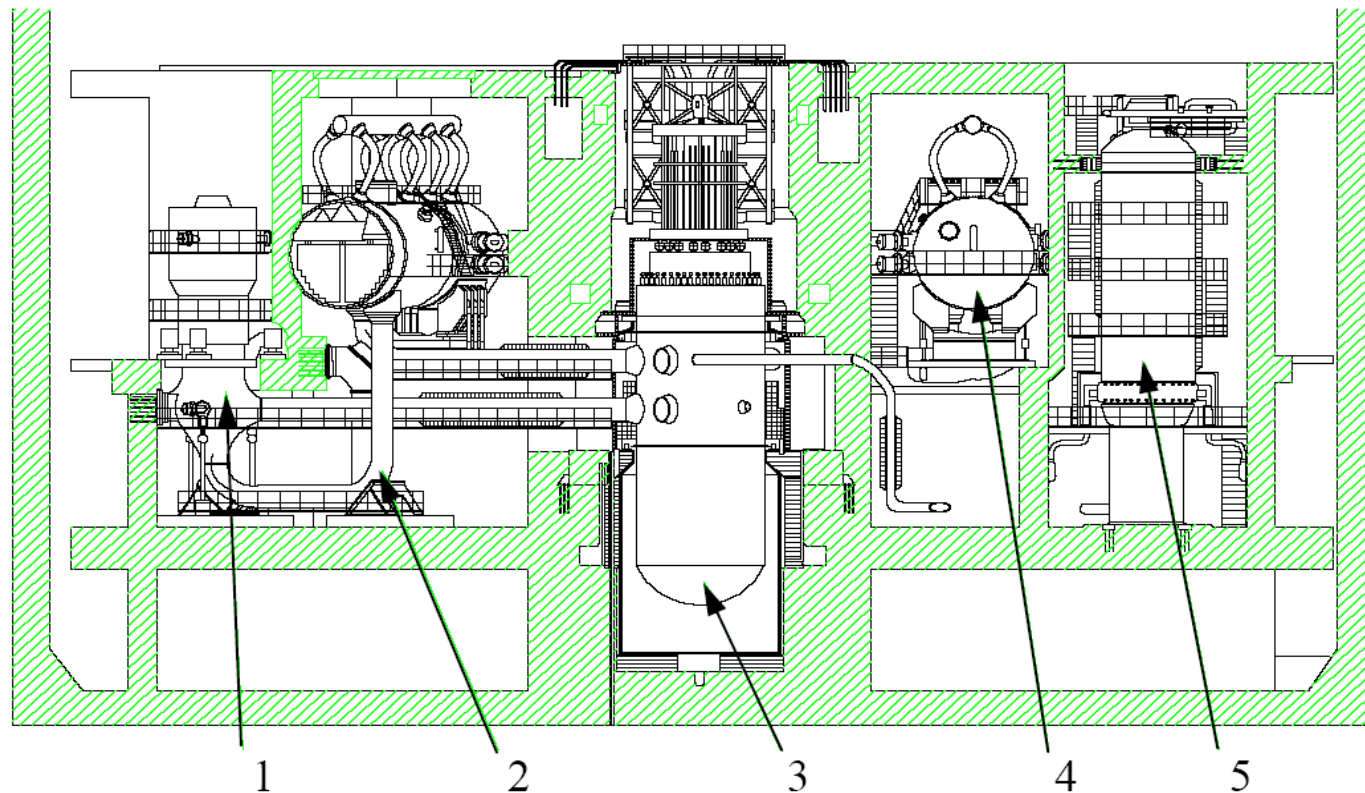
### 3. Состав моделируемого оборудования

- Реактор и активная зона.
- Первый контур: холодная и горячая нитки ГЦК, ГЦН, ПГ.
- Компенсатор давления (КД) и система компенсации давления первого контура.
- Система подпитки-продувки первого контура, включая систему борного регулирования.
- Второй контур: трубопроводы пара и воды, ГПК, ТПН.
- Система управления и защиты.
- Системы безопасности.
- Другие системы, представленные в «КОС-АЗ».

## 3.1. Назначение и характеристика реактора ВВЭР-1000

- Предназначен для производства тепла в составе ППУ.
- Водно - водяной реактор корпусного типа под давлением.
- Управление цепной реакцией производится двумя способами – введением твёрдого и жидкого поглотителя.
- Твёрдый поглотитель – система ОР СУЗ – предназначен для управления в манёвренных режимах и останова реактора.
- Жидкий поглотитель – растворённый в воде бор – предназначен для компенсации изменений, связанных с выгоранием топлива в ходе топливной кампании.

# Схема расположения основного оборудования РУ в гермооболочке



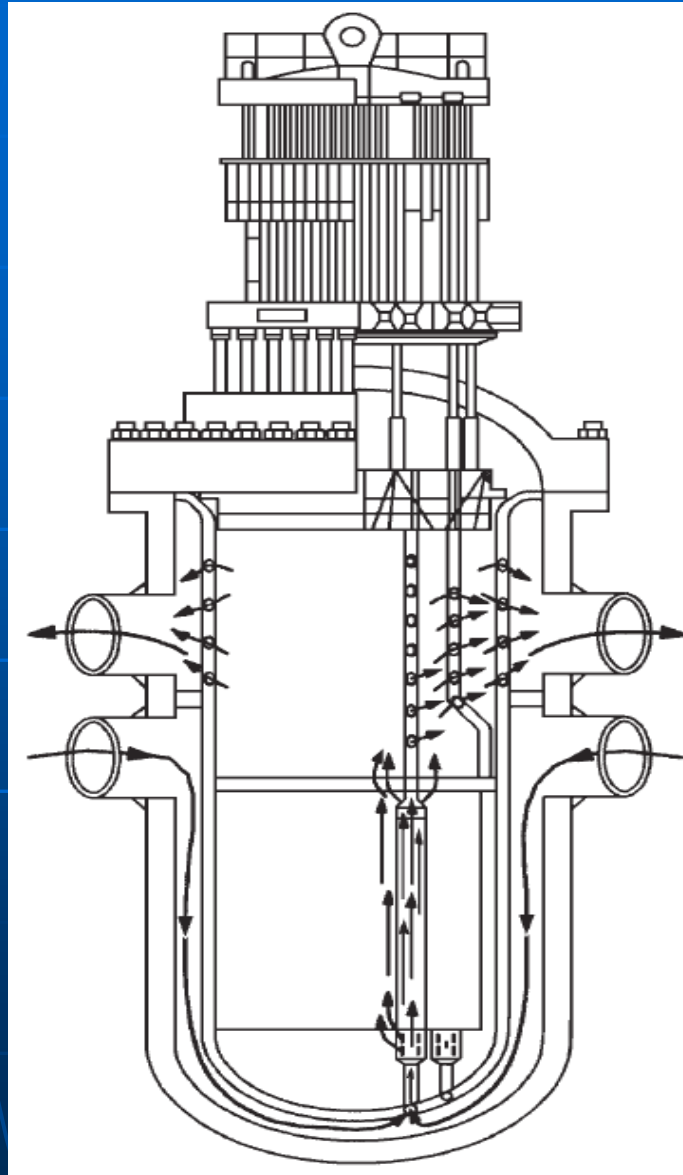
1. Main Circulation Pump
2. Primary Circuit Pipelines
3. Reactor Vessel
4. Steam Generator
5. Pressurizer

# Конструкция реактора ВВЭР-1000

- Корпус реактора.
- Привода ОР СУЗ.
- Верхний блок.
- Внутрикорпусные устройства: блок защитных труб, шахта, выгородка.
- Входные и выходные отверстия.
- Верхняя и нижняя опорная плита.
- Активная зона, набранная из тепловыделяющих сборок (ТВС).



# Схема циркуляции теплоносителя 1-го контура в корпусе реактора

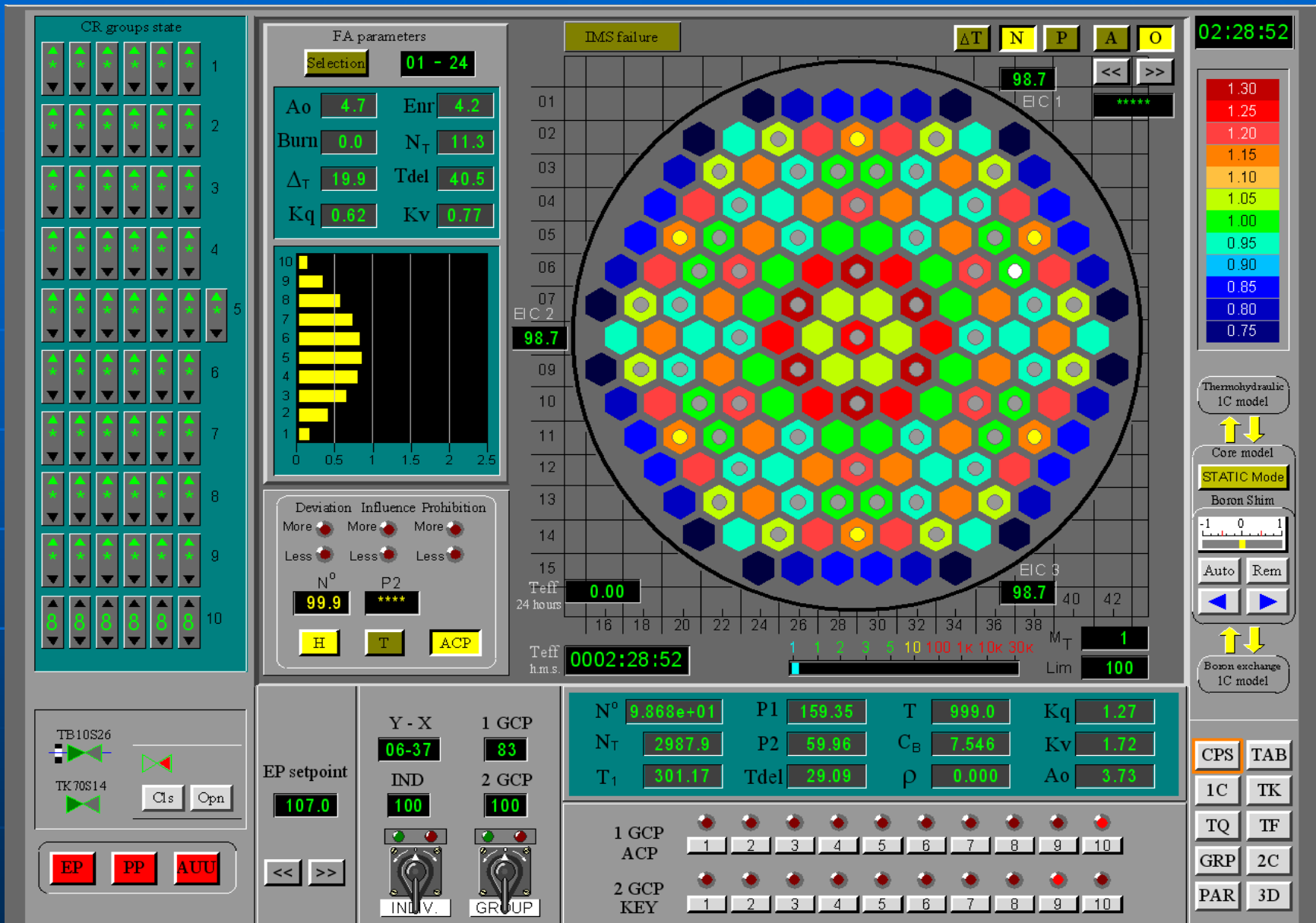


# Основные характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000

| Наименование характеристики, размерность                    | Величина |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| Номинальная тепловая мощность активной зоны, МВт            | 3000     |
| Расход теплоносителя через активную зону, м <sup>3</sup> /ч | 88000    |
| Удельная тепловая мощность, КВт/л                           | 107.8    |
| Число ТВС, шт.                                              | 163      |
| Число ОР СУЗ, шт.                                           | 61       |
| Шаг между ТВС, см                                           | 23.6     |
| Высота активной зоны в холодном состоянии, см               | 353.0    |



# Активная зона



# Основные характеристики ТВС реактора ВВЭР-1000

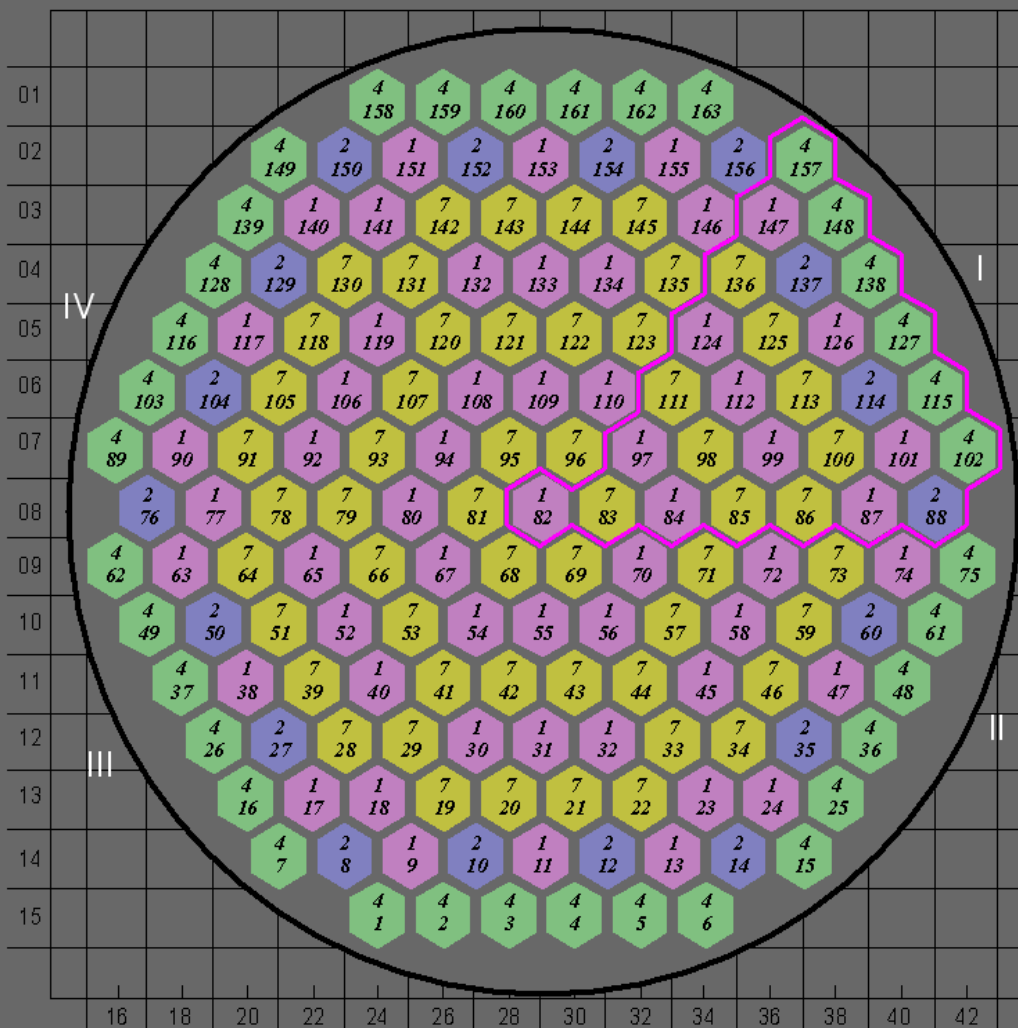
| Наименование характеристики, размерность                  | Величина    |
|-----------------------------------------------------------|-------------|
| Сетка расположение твэлов                                 | треугольная |
| Количество твэлов в ТВСА                                  | 312         |
| Шаг расположения твэлов, см                               | 1.275       |
| Размер 'под ключ', номинальный, см                        | 23.4        |
| Количество НК, шт.                                        | 18          |
| Материал НК                                               | Э-635       |
| Наружный диаметр НК, см                                   | 1.25        |
| Внутренний диаметр НК, см                                 | 1.09        |
| Толщина стенки НК, см                                     | 0.08        |
| Плотность материала НК, г/см <sup>3</sup>                 | 6.55        |
| Количество ДР в активной части штатной ТВСА/всего, шт.    | 13 / 15     |
| Материал ДР                                               | Э-110       |
| Вес ДР, кг                                                | 0.55        |
| Материал центральной трубки                               | Э-635       |
| Наружный диаметр центральной трубки, см                   | 1.3         |
| Внутренний диаметр центральной трубки, см                 | 1.1         |
| Толщина стенки центральной трубки, см                     | 0.1         |
| Плотность материала центральной трубки, г/см <sup>3</sup> | 6.55        |

## ТВС, входящие в состав 1-ой и 5-ой топливных загрузок

| Сорт ТВС                         | Обозначение на картограмме загрузки |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| ТВС с 2% обогащением             | 7                                   |
| ТВС с 3% обогащением             | 1                                   |
| ТВС с 4.23% обогащением + СВП    | 4                                   |
| ТВС с 4.4% обогащением + СВП     | 2                                   |
| ТВС с 4.233% обогащением без СВП | 5                                   |
| ТВС с 4.4% обогащением без СВП   | 3                                   |

# 1-ая топливная загрузка

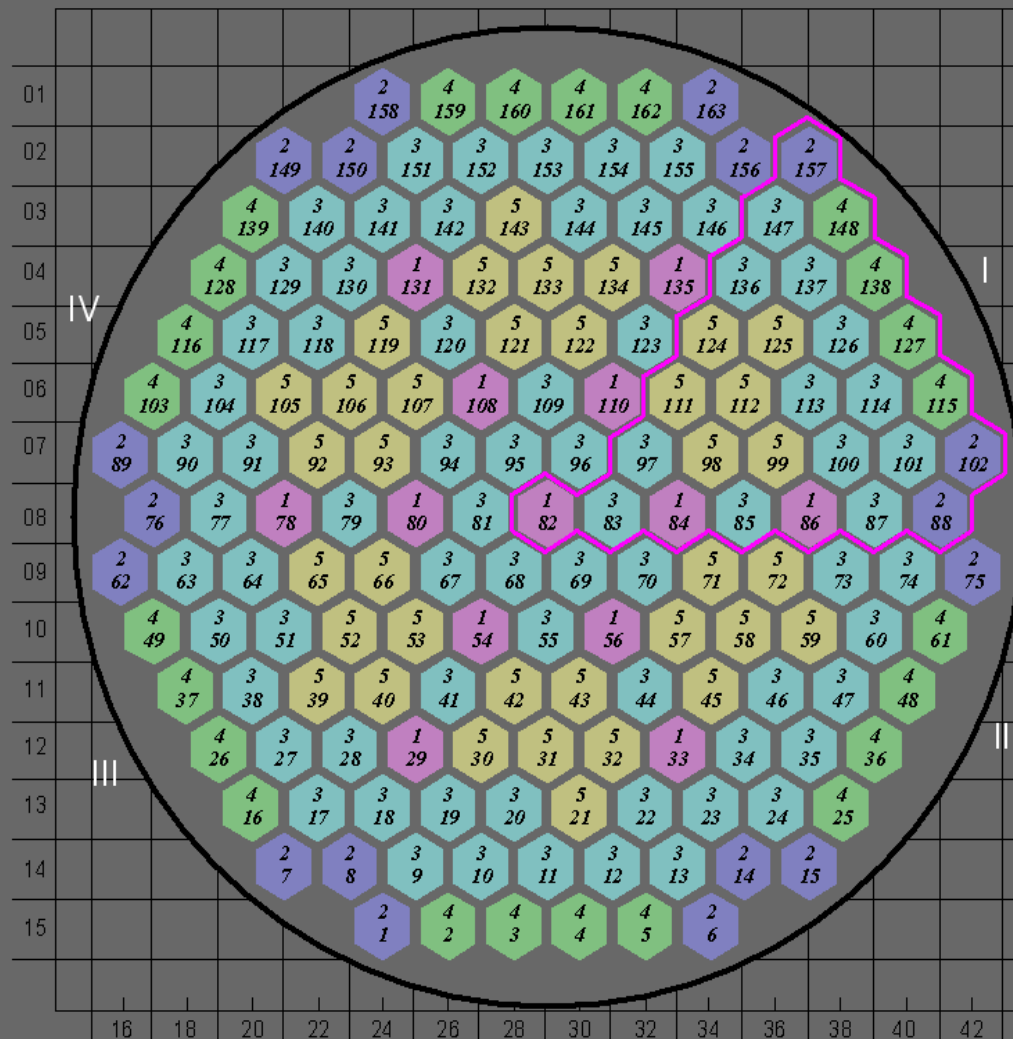
ЮУАЭС, БЛОК 3, ЗАГРУЗКА 1



| Выбор сорта кассеты |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| 1                   | 1 007_30FL_3.00%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 2                   | 2 002_44FL_4.40%_SBA36_Pr0.0_D24Fe             |
| 3                   | 3 001_44FL_4.40%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 4                   | 4 005_42FL_4.40%_SBA36_Pr3.6%66_D24Fe          |
| 5                   | 5 004_42FL_4.40%_SBA00_Pr3.6%66_D24Fe          |
| 6                   | 6 009_16FL_1.60%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 7                   | 7 011_20FS_2.00%_SBA00_Pr0.0_D14Fe             |
| 8                   | 8 013_33FS_3.30%_SBA00_Pr0.0_D14Fe             |
| 9                   | 9 015_32FS_3.30%_SBA00_Pr3.0%66_D14Fe          |
| 10                  | 10 017_30FS_3.00%_SBA00_Pr0.0_D14Fe            |
| 11                  | 11 023_42FL_4.40%_SBA65_Pr3.6%66_D24Fe         |
| 12                  | 12 085_30FL_3.00%_SBA36_Pr0.0_D24Fe            |
| 13                  | 13 094_UO2_4.00%_SBA65_Pr3.6%66_D24Zr          |
| 14                  | 14 140_390A_4.00%_SBA36_Pr3.0%30_D15Zr         |
| 15                  | 15 141_390A_4.00%_SBA00_Pr3.0%30_D15Zr         |
| 16                  | 16 144_382A_4.00%_SBA36_Pr3.3%30,3.0%36_D15Zr  |
| 17                  | 17 146_382A_4.00%_SBA00_Pr3.3%30,3.0%36_D15Zr  |
| 18                  | 18 149_294A_3.00%_SBA20_Pr2.4%30_D15Zr         |
| 19                  | 19 150_294A_3.00%_SBA00_Pr2.4%30_D15Zr         |
| 20                  | 20 153_UO2_4.00%_SBA00_6Gd5_3.0_Pr3.3%66_D15Zr |

# 5-ая топливная загрузка

ЮУАЭС, БЛОК 3, ЗАГРУЗКА 5



Выбор сорта кассеты

|    |                                                |
|----|------------------------------------------------|
| 1  | 1 007_30FL_3.00%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 2  | 2 002_44FL_4.40%_SBA36_Pr0.0_D24Fe             |
| 3  | 3 001_44FL_4.40%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 4  | 4 005_42FL_4.40%_SBA36_Pr3.6%66_D24Fe          |
| 5  | 5 004_42FL_4.40%_SBA00_Pr3.6%66_D24Fe          |
| 6  | 6 009_16FL_1.60%_SBA00_Pr0.0_D24Fe             |
| 7  | 7 011_20FS_2.00%_SBA00_Pr0.0_D14Fe             |
| 8  | 8 013_33FS_3.30%_SBA00_Pr0.0_D14Fe             |
| 9  | 9 015_32FS_3.30%_SBA00_Pr3.0%66_D14Fe          |
| 10 | 10 017_30FS_3.00%_SBA00_Pr0.0_D14Fe            |
| 11 | 11 023_42FL_4.40%_SBA65_Pr3.6%66_D24Fe         |
| 12 | 12 085_30FL_3.00%_SBA36_Pr0.0_D24Fe            |
| 13 | 13 094_UO2_4.00%_SBA65_Pr3.6%66_D24Zr          |
| 14 | 14 140_390A_4.00%_SBA36_Pr3.0%30_D15Zr         |
| 15 | 15 141_390A_4.00%_SBA00_Pr3.0%30_D15Zr         |
| 16 | 16 144_382A_4.00%_SBA36_Pr3.3%30_3.0%36_D15Zr  |
| 17 | 17 146_382A_4.00%_SBA00_Pr3.3%30_3.0%36_D15Zr  |
| 18 | 18 149_294A_3.00%_SBA20_Pr2.4%30_D15Zr         |
| 19 | 19 150_294A_3.00%_SBA00_Pr2.4%30_D15Zr         |
| 20 | 20 153_UO2_4.00%_SBA00_6Gd5_3.0_Pr3.3%66_D15Zr |

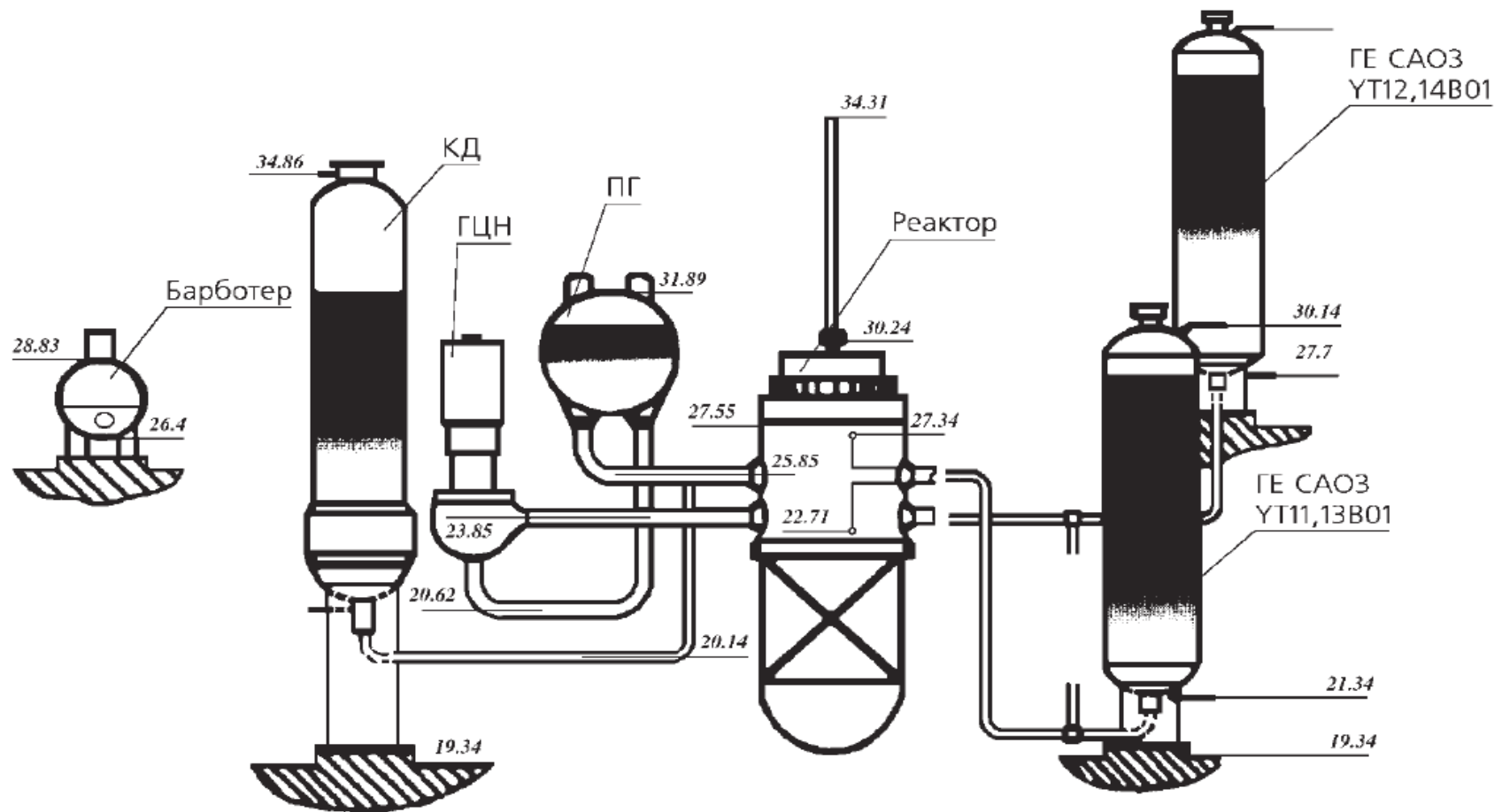
## 3.2. Назначение 1-го контура

Первый контур предназначен для охлаждения активной зоны реактора, транспортировки и передачи тепла во второй контур в парогенераторе.

### Состав оборудования 1-го контура

- Реактор.
- Четыре петли главного циркуляционного контура (ГЦК): горячие и холодные нитки.
- Четыре главных циркуляционных насоса (ГЦН).
- Четыре парогенератора (ПГ).
- Четыре автоматизированных регулятора уровня в ПГ.
- Компенсатор давления (КД) и система компенсации давления (объёма).
- Пассивная система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) высокого давления.

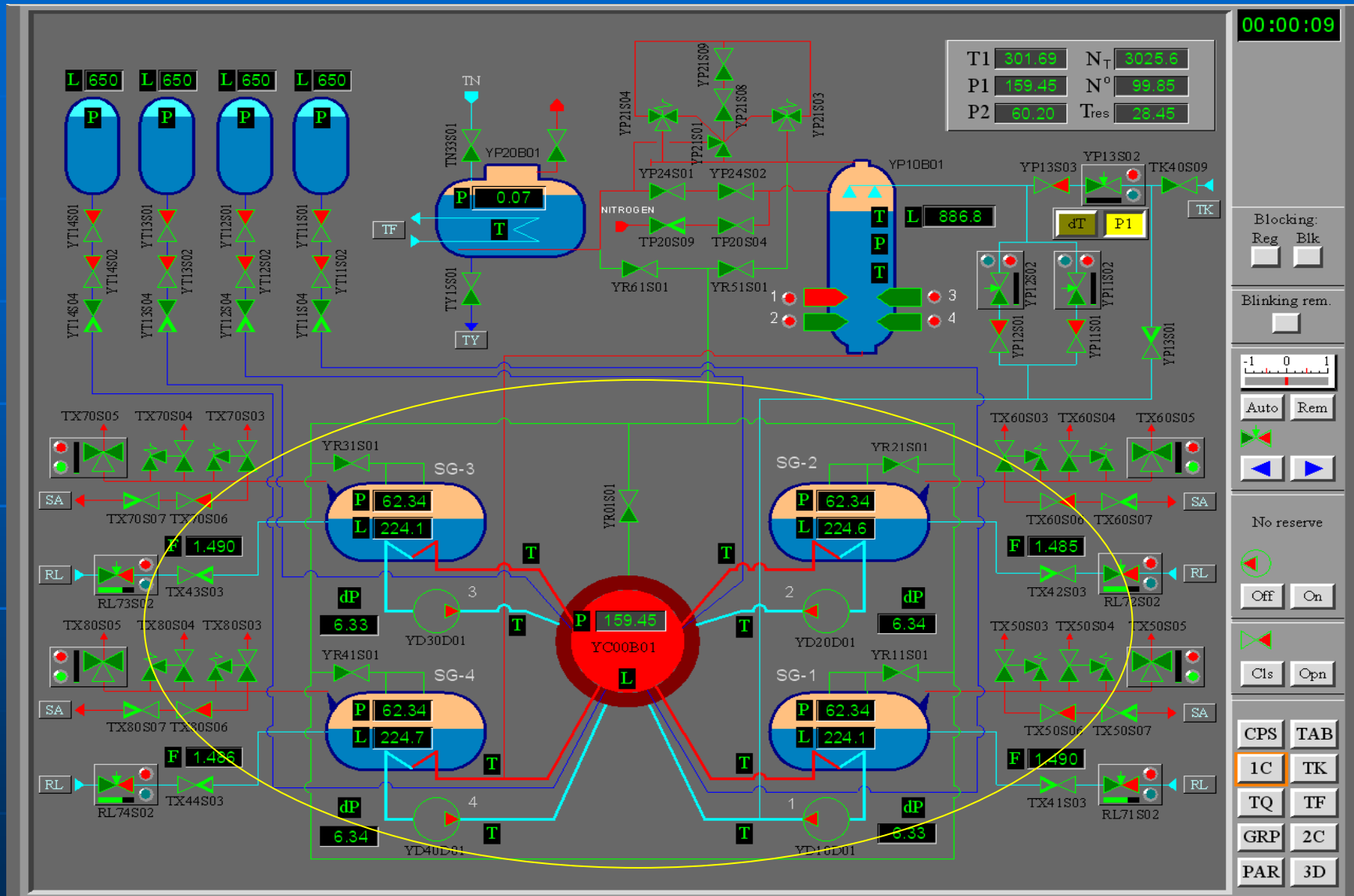
# Первый контур унифицированного ВВЭР-1000



Упрощенная схема первого контура с  
указанием повысительных отметок



# Первый контур: холодная и горячая нитки ГЦК, ГЦН, ПГ



### 3.3. Назначение КД и системы компенсации давления первого контура

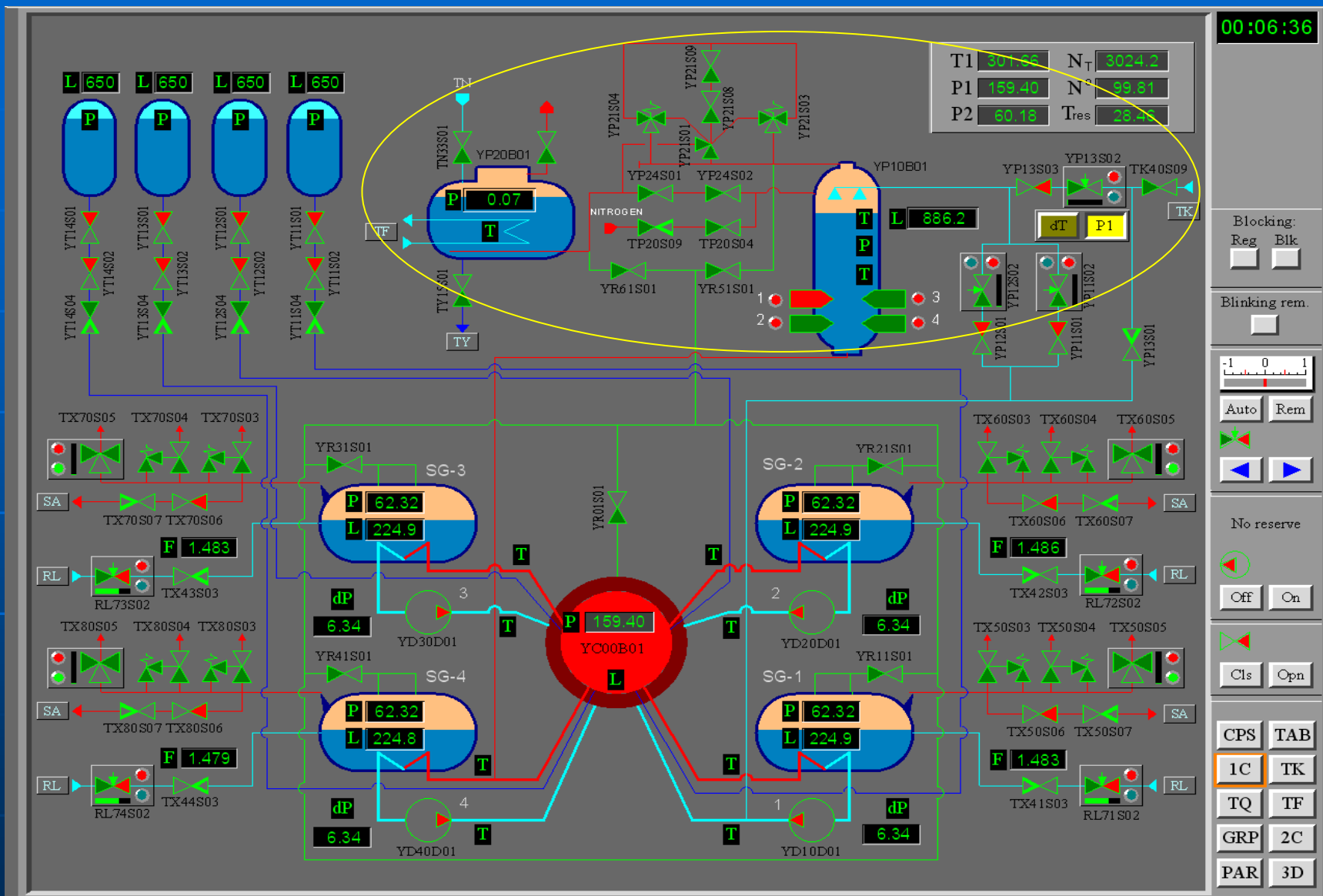
Принципиальное назначение КД и системы компенсации давления — поддержание теплоносителя первого контура в жидком состоянии.

- Контроль давления 1-го контура в стационарном и переходных режимах управления ЯЭУ.
- Защита оборудования 1-го контура от превышения проектных ограничений по давлению.
- Увеличение давления в 1-ом контуре в ходе разогреве и пуске ЯЭУ.
- Снижение давления при останове и расхолаживании ЯЭУ.

# Состав оборудования 1-го контура: КД и система компенсации давления

- Компенсатор давления (КД).
- Четыре группы электронагревателей КД.
- Сплинкерная система («душ») КД.
- Разгрузочные и импульсные предохранительные клапана (ИПД).
- Барботёр (сдувки из корпуса, ПГ и КД).
- Соединительные линии воды и пара.

## КД и система компенсации давления первого контура



## 3.4. Назначение системы подпитки – продувки первого контура

- Поддержание объёма теплоносителя в 1-ом контуре (уровня в КД).
- Компенсация протечек 1-го контура.
- Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура.
- Очистка теплоносителя 1-го контура.

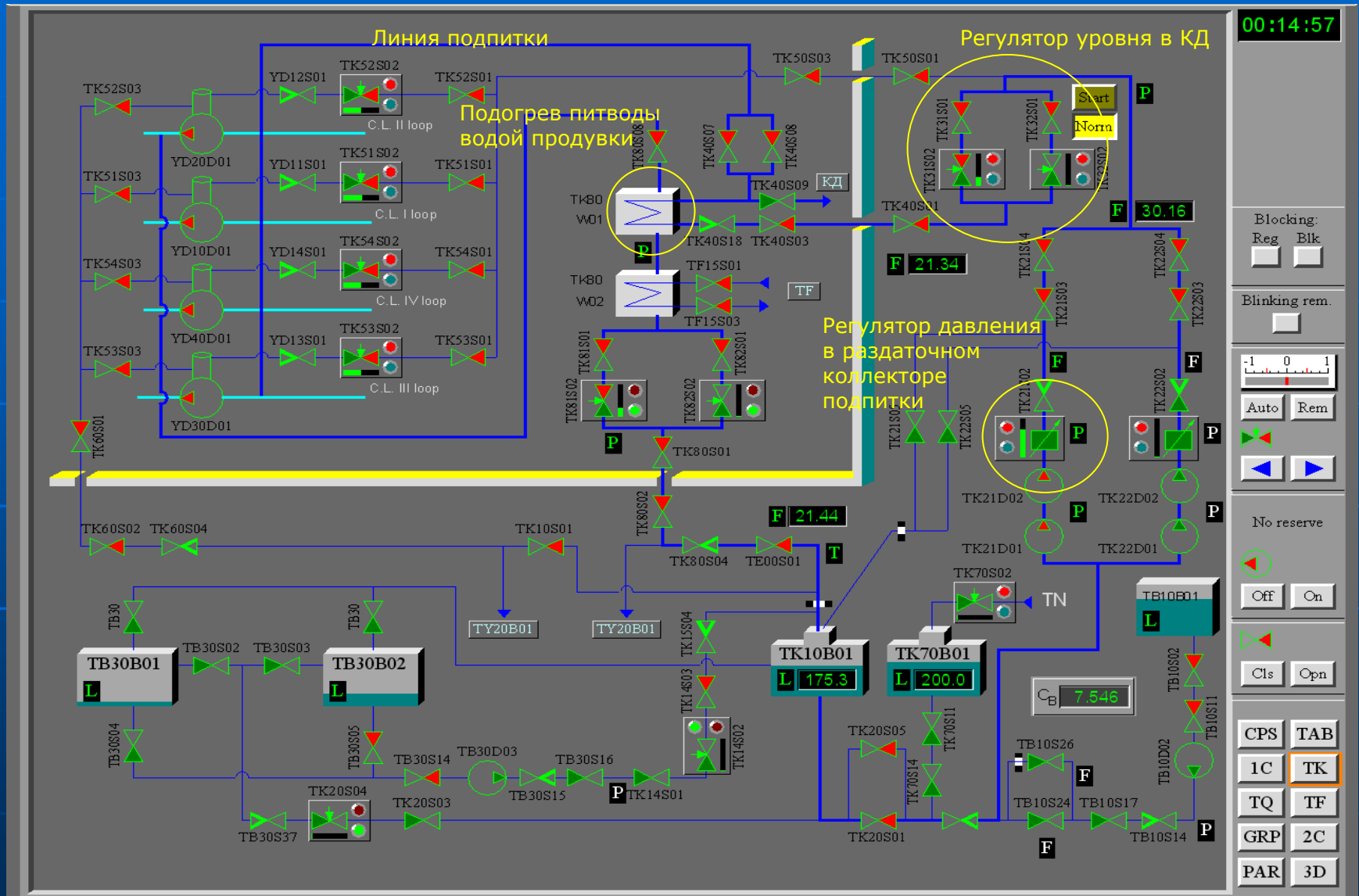
# Состав оборудования системы подпитки - продувки первого контура

- Система подпитки. Расположена вне контеймента.
- Система продувки. Расположена внутри контеймента.
- Баковое хозяйство.
- Система борного регулирования первого контура.

### 3.4.1. Состав системы подпитки первого контура

- Две линии, в каждой из которых по два насоса и автоматический регулятор давления в раздаточном коллекторе подпитки.
- Регулятор уровня в КД.
- Теплообменник для подогрева воды подпитки.
- Четыре линии, соединённые с четырьмя холодными нитками ГЦК.

# Система подпитки первого контура

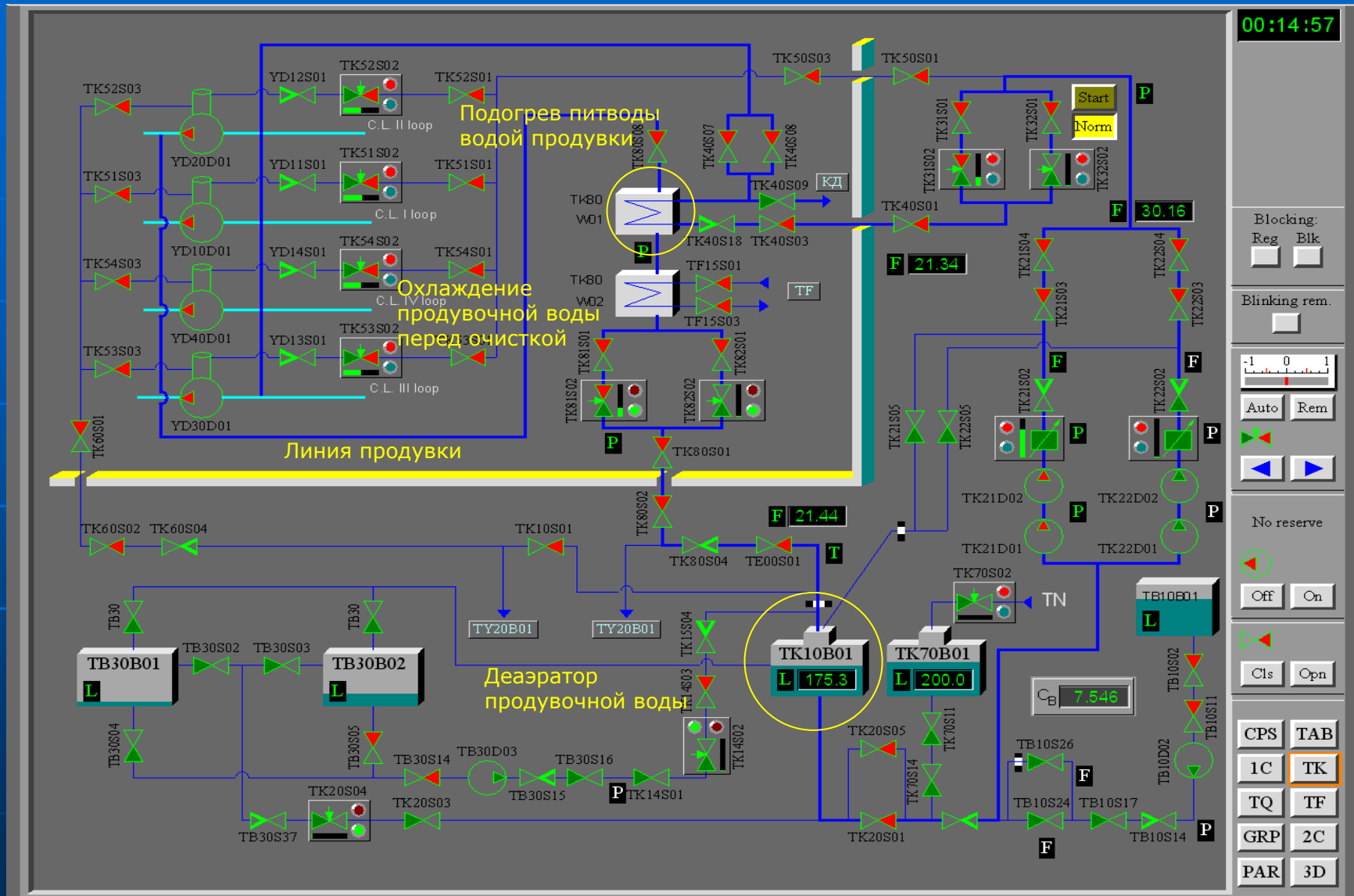




### 3.4.2. Состав системы продувки первого контура

- Линия продувки, соединённая с холодной ниткой № 2 ГЦК.
- Два теплообменника.
- Два автоматических регулятора.
- Деаэратор продувочной воды.

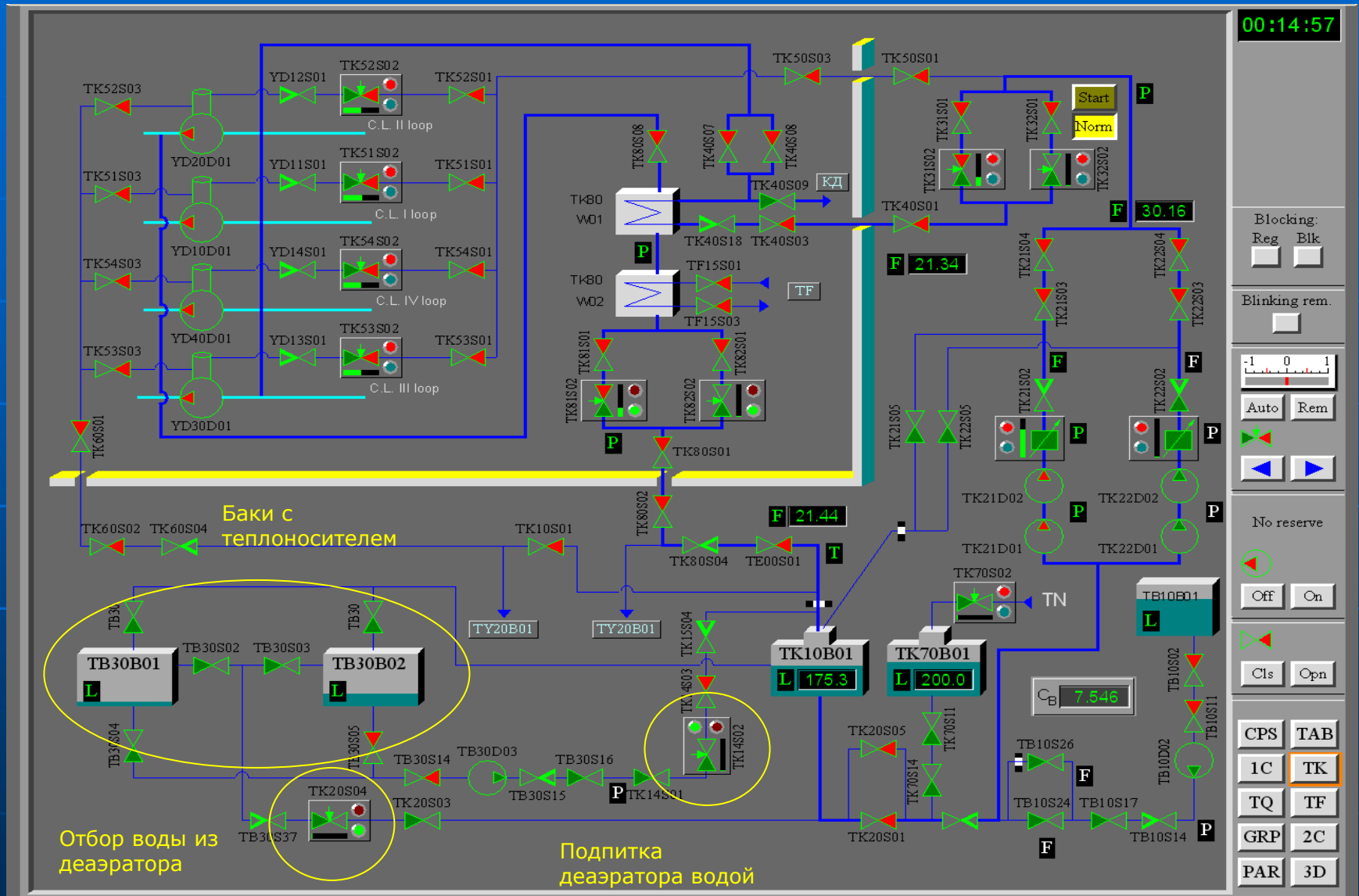
# Система продувки первого контура



### 3.4.3. Состав бакового хозяйства

- Два бака с теплоносителем с текущей концентрацией борной кислоты.
- Регулятор отбора воды из контура продувки.
- Регулятор подпитки водой контура продувки.
- Соединительные линии с насосом.

# Баковое хозяйство первого контура



### 3.4.4. Состав системы борного регулирования

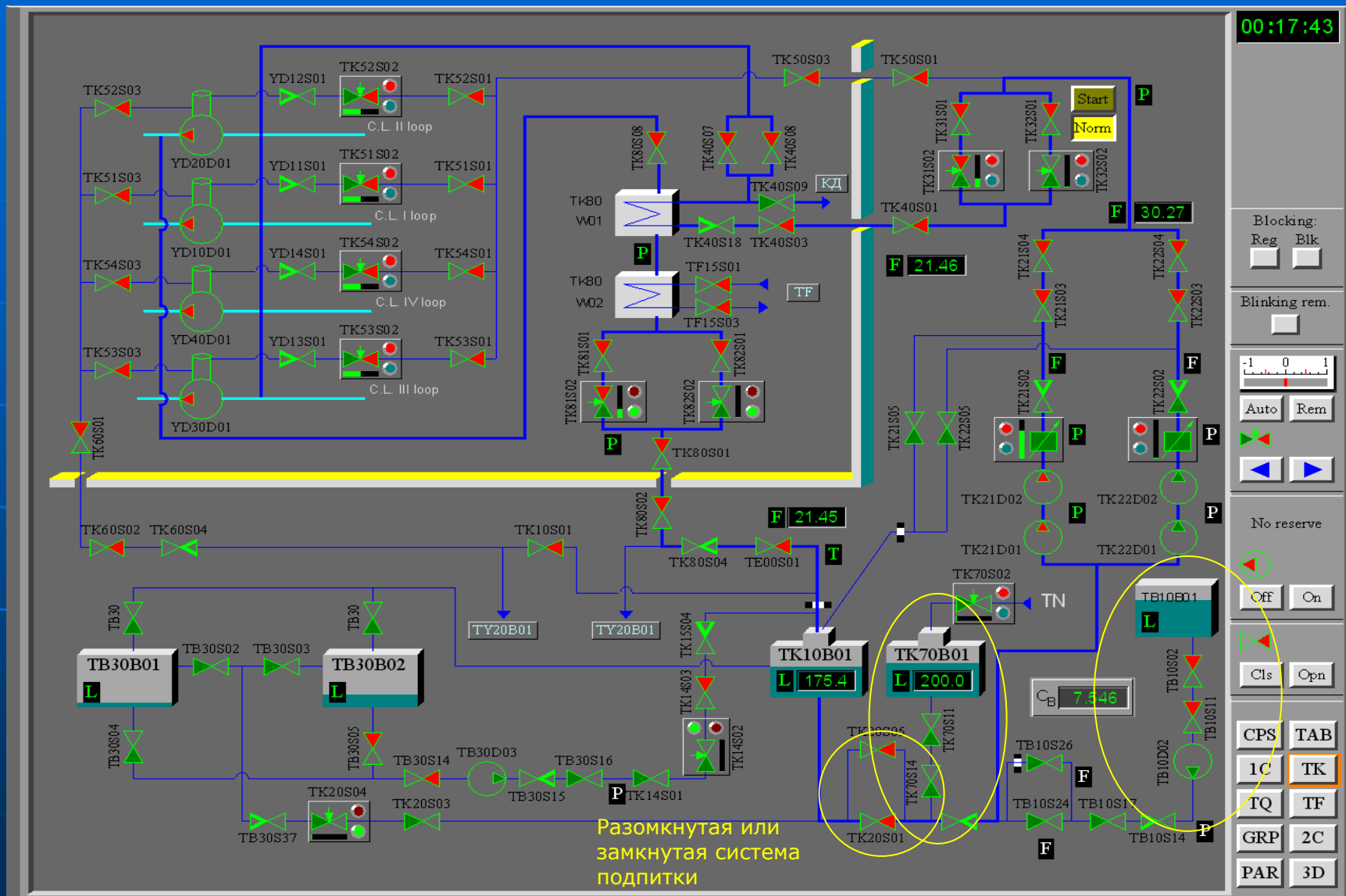
- Бак с бором высокой концентрации.
- Линия подпитки бором с насосом.
- Бак с чистой водой для вывода бора из 1-го контура.

### Схемы работы системы борного регулирования

- Разомкнутая система впрыска бора или чистой воды. Задвижка от деаэратора в систему подпитки закрыта. Подпитка производится из баков с борированной или чистой водой.
- Замкнутая система. Теплоноситель из деаэратора разбавляется борированной или чистой водой.

Система борного регулирования входит в состав Системы управления и защиты реактора

# Система борного регулирования первого контура



## 3.5. Назначение и работа 2-го контура

Второй контур предназначен для отвода тепла 1-го контура. Тепло отводится через парогенератор, где теплоноситель 2-го контура превращается в пар, поступающий на турбину.

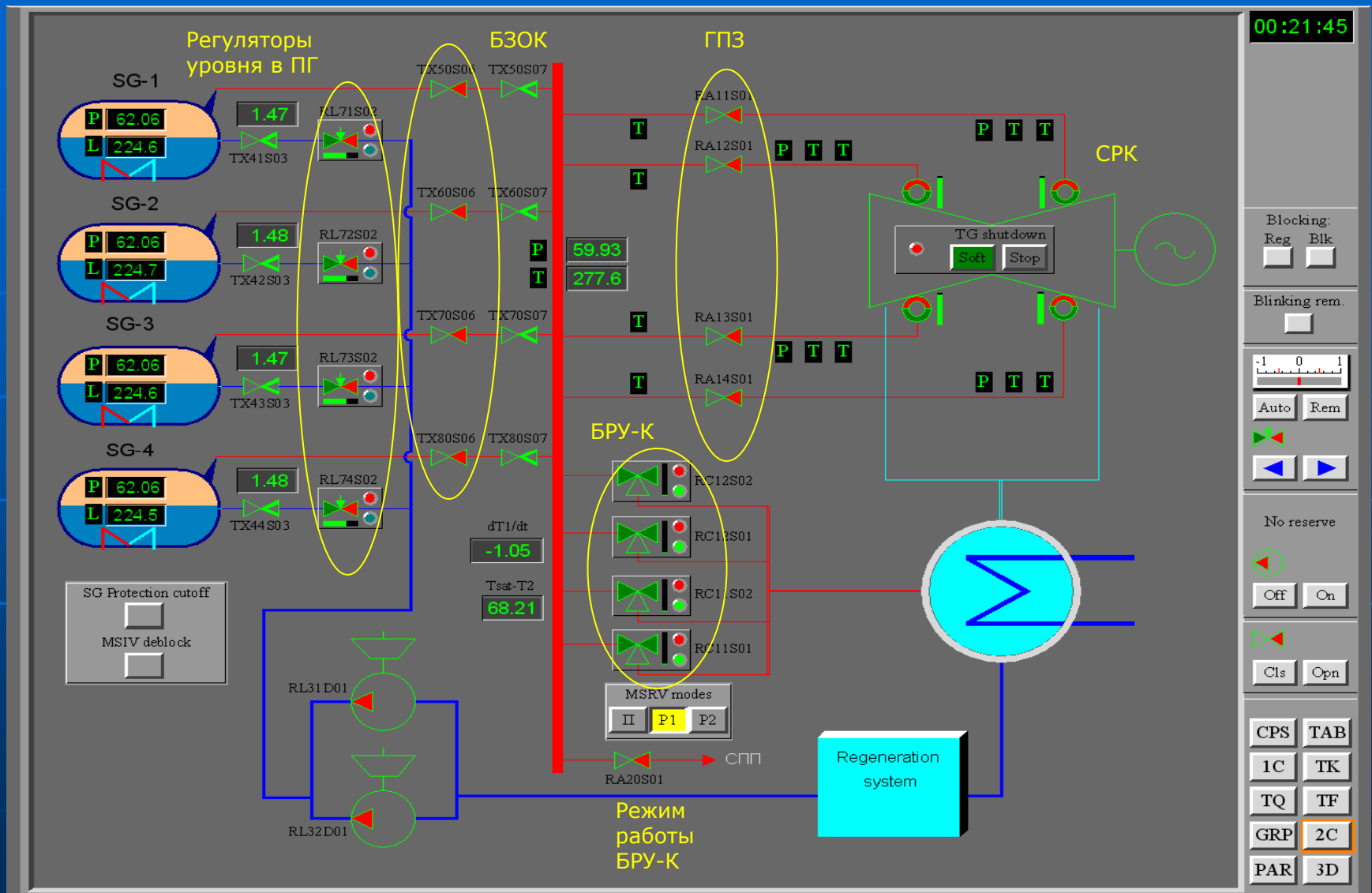
Тепловая энергия пара превращается в механическую энергию вращения турбины, соединённой с генератором электроэнергии.

# Состав оборудования 2-го контура

- Четыре горизонтальных парогенератора (ПГ).
- Автоматизированные регуляторы уровня в ПГ.
- Быстродействующие запорные отсечные клапана (БЗОК).
- Главный паровой коллектор (ГПК).
- Четыре главных паровых задвижки (ГПЗ).
- Стопорные регулирующие клапана (СРК) на турбине.
- Турбина и генератор.
- Конденсатор.
- Два турбо - питательных насоса ПГ (ТПН).
- Четыре быстрых редукционных устройства в конденсатор (БРУ-К).
- Переключатель режима работы БРУ-К.
  - “ST” – пусковой режим, поддержание давления в ГПК при пуске.
  - “P1” – «стерегущий» режим при работе на мощности, “P2” – мягкий режим для конца кампании (клапана закрыты).



# Второй контур: трубопроводы пара и воды, ГПК, ТПН



## 3.6. Назначение системы управления и защиты реактора

Принципиальное назначение системы управления и защиты реактора – контроль и управлением мощностью реактора, поддержание теплового баланса в реакторной установке.

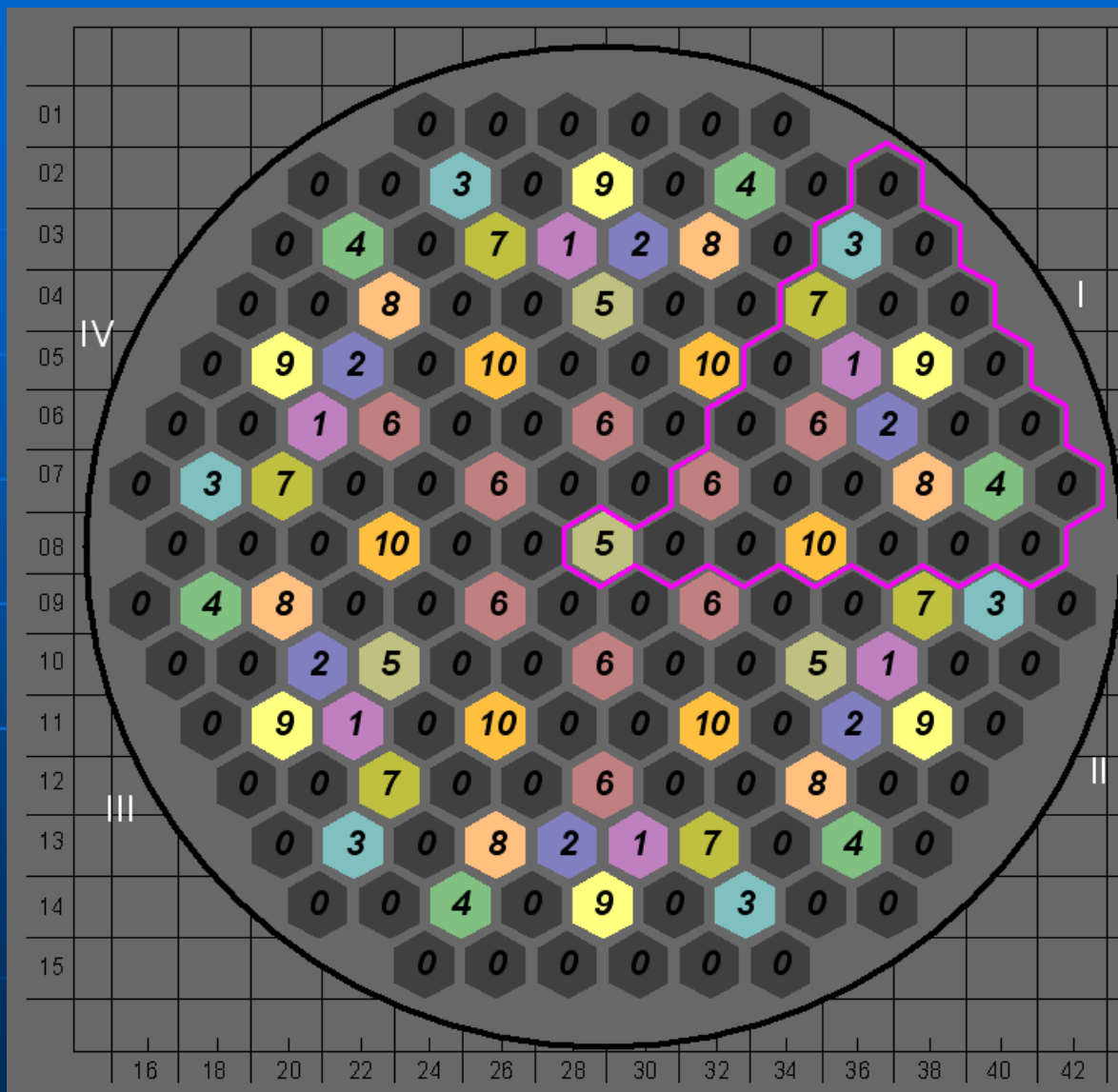
### Состав системы управления и защиты реактора

- Система ОР СУЗ.
- Система борного регулирования.
- Система контроля нейтронного потока (АКНП).
- Системы  
АЗ (аварийной защиты),  
ПЗ (предупредительной защиты),  
РОМ (регулятор ограничения мощности),  
АРМ (автоматический регулятор мощности),  
УРБ (ускоренная разгрузка блока).

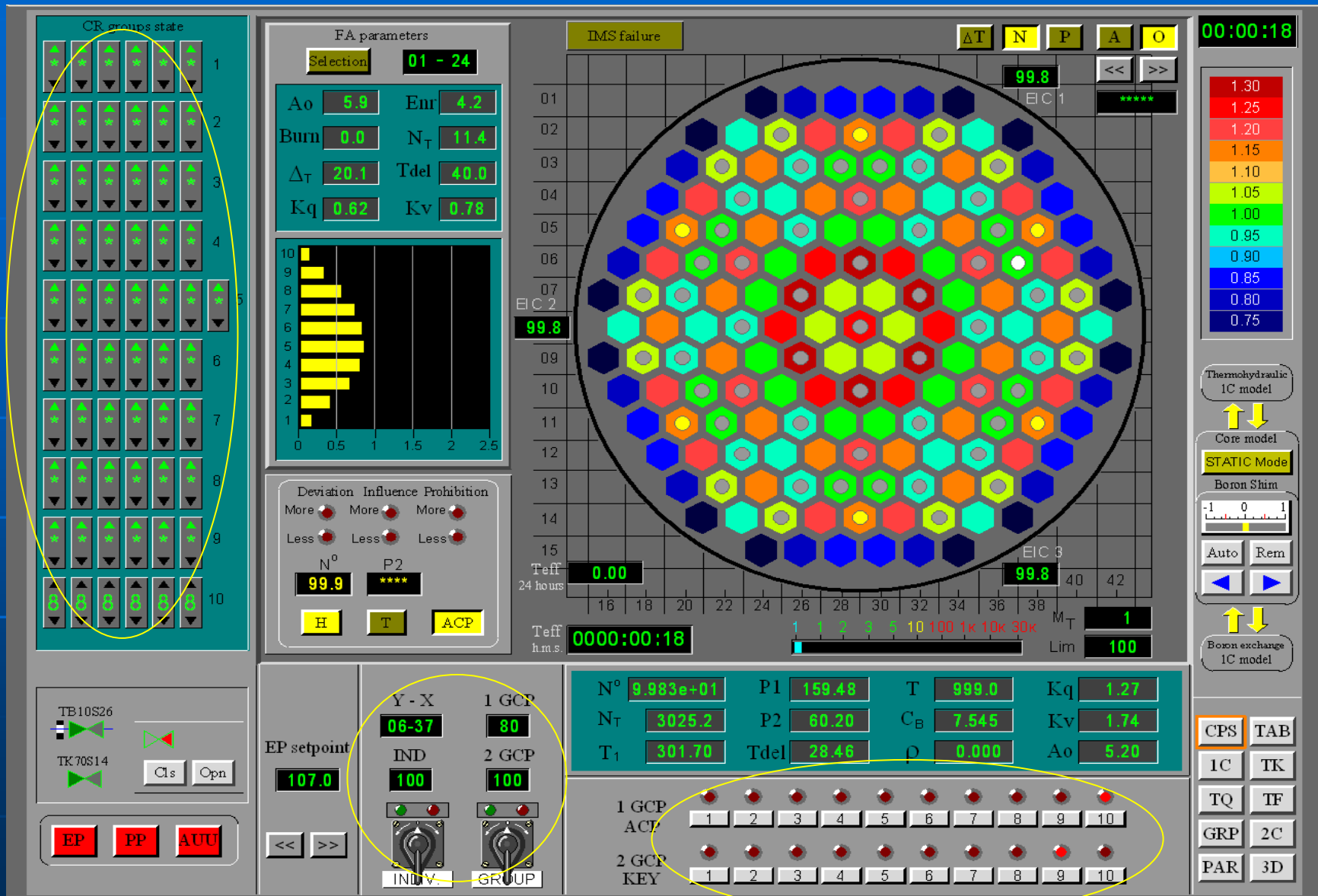
## 3.6.1. Назначение системы ОР СУЗ

- Поддержание критического состояния реактора на стационарном уровне мощности.
- Контроль распределения поля энерговыделения в активной зоне.
- Изменение уровня мощности реактора.
- Обеспечение предупредительной и аварийной защиты реактора.

# Картограмма размещения групп ОР СУЗ в активной зоне



# Отображение и управление положением групп ОР СУЗ в «КОС-А3»



## 3.6.2. Назначение системы борного регулирования

Система борного регулирования предназначена для компенсации медленных изменений реактивности и поддержания критического состояния реактора при:

- Работе реактора на мощности.
- Пуске и останове реактора.

## В нормальных режимах эксплуатации борное регулирование:

- Компенсирует медленные изменения реактивности, связанные с выгоранием топлива и ксеноновыми переходными процессами.
- Компенсирует рост реактивности, связанный с распадом ксенона при расхолаживании реактора.
- Обеспечивает подкритичность реактора в ходе перегрузки топлива и ППР.

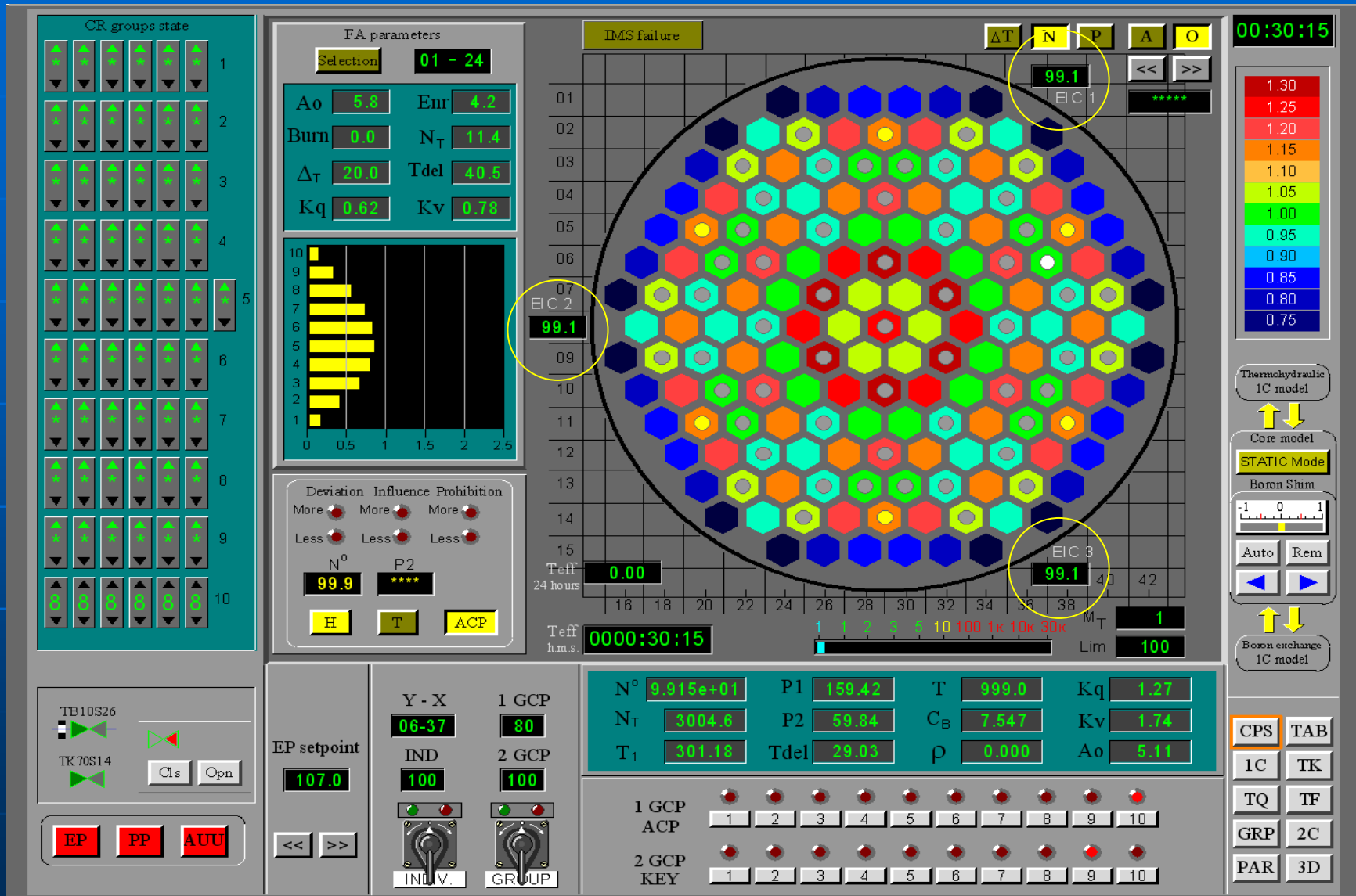
Конструктивно система борного регулирования входит в систему подпитки-продувки 1-го контура.

### 3.6.3. Назначение системы контроля нейтронного потока (АКНП)

- Контроль нейтронного потока, определение нейтронной мощности и периода реактора.
- Сравнение нейтронной мощности и периода реактора с уставками и генерация сигналов для системы управления и защиты (АЗ, ПЗ, РОМ).



# Расположение БИК системы АКНП



## 3.6.4. Системы АЗ, ПЗ, РОМ, АРМ, УРБ

### Система АЗ (аварийной защиты)

- Предназначена для останова работы реактора.
- Сигнал АЗ приводит к падению всех ОР СУЗ в активную зону.
- Причины появления сигнала АЗ:
  - период реактора менее 10 сек
  - мощность реактора выше уставки (107%)
  - падение давления в 1-ом контуре
  - рост температуры теплоносителя в 1-ом контуре и т.д.

# Система ПЗ (предупредительной защиты)

- Предназначена для запрета увеличения мощности реактора или уменьшения мощности до безопасных пределов.
- Сигналы ПЗ приводят к:
  - погружению групп ОР СУЗ в штатной последовательности с рабочей скоростью до снятия сигнала (ПЗ-1, РОМ)
  - запрету увеличения мощности до снятия сигнала (ПЗ-2) через запрет на извлечение ОР СУЗ из активной зоны

- Причины появления сигнала ПЗ-1:
  - период менее 20 сек.
  - превышение уставки по нейтронной или тепловой мощности
  - превышение уставок по давлению и температуре 1-го контура и др.
  - нажатие кнопки ПЗ-1 оператором приводит к последовательному снижению мощности до тех пор, пока кнопка не будет отжата
- Причины появления сигнала ПЗ-2:
  - уровень нейтронной мощности по АКНП в диапазоне источника
  - превышение уставки по давлению 1-го контура (уставка ниже ПЗ-1)
  - падение одного из ОР СУЗ

# Система РОМ (регулятор ограничения мощности)

- Функционально является частью ПЗ-1.
- Предназначена для снижения и ограничения мощности реактора.
- Сигнал РОМ приводит к погружению групп ОР СУЗ в штатной последовательности с рабочей скоростью до снятия сигнала.
- Причиной появления сигнала РОМ могут быть различные несоответствия между текущей мощностью и состоянием энергоблока по
  - количеству работающих ГЦН
  - количеству работающих ТПН и др.

# Система АРМ (автоматический регулятор мощности)

- Предназначен для поддержания мощности реактора в соответствии с мощностью турбогенератора на основании сигналов АКНП.
- Работает в двух режимах:
  - «Т» - поддержания постоянного давления в ГПК (ЭЧСР контролирует мощность генератора).
  - «Н» - режим поддержания нейтронной мощности реактора (ЭЧСР контролирует давление в ГПК).

- Автоматический переход в режим «Н» происходит, если
  - нейтронная мощность превышает уставку более чем на 2%
  - появился любой сигнал ПЗ
- Автоматический переход в режим «Т» происходит, если давление в ГПК превышает уставку на 2 кг/см<sup>2</sup>
- Запрет увеличения мощности реактора происходит, если
  - нейтронная мощность превышает 102% уставки
  - период реактора менее 40 сек

# Система УРБ (ускоренная разгрузка блока)

- Предназначена для быстрого снижения мощности реактора.
- Система УРБ активируется при работе реактора на 75% установленной мощности и выше.
- Появление сигнала УРБ приводит к падению группы ОР СУЗ в активную зону.
- Сигнал УРБ возникает при:
  - останове двух из четырёх ГЦН, мощность реактора снижается до 50% (40%, если ГЦН смежные)
  - останове одного из двух ТПН, мощность реактора снижается до 50%
  - уменьшения нагрузки турбогенератора до нуля, мощность реактора снижается до 40%
  - прекращения подачи пара на турбину, мощность реактора снижается до 40%



# Табло сигнализации

00:37:00

|                                                                                        |  |                                                 |                                                   |                                                   |                                                      |                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>EP</b> <span style="float: right;">Б</span><br>EP deblock. <input type="checkbox"/> |  | EP from CR                                      | N > Setpoint <span style="float: right;">Б</span> | dT s1 < 10 <span style="float: right;">Б</span>   | P1 < 150 N > 75 <span style="float: right;">Б</span> | L SG - 650 <span style="float: right;">Б</span>    |
|                                                                                        |  | P mss > 80 <span style="float: right;">Б</span> | T < 10 sec <span style="float: right;">Б</span>   | dT s1-2 > 75 <span style="float: right;">Б</span> | P1 < 140 <span style="float: right;">Б</span>        | F < 46 <span style="float: right;">Б</span>        |
|                                                                                        |  | P1 > 180 <span style="float: right;">Б</span>   | < 2 ГЦН <span style="float: right;">Б</span>      | Th.I. > 330 <span style="float: right;">Б</span>  | dP MCP < 2.5 <span style="float: right;">Б</span>    | L Press < 400 <span style="float: right;">Б</span> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div style="text-align: center;"> <b>PP-1</b> <span style="float: right;">Б</span> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>             PP from CR<br/>             T &lt; 20 sec <span style="float: right;">Б</span><br/>             P1 &gt; 172 <span style="float: right;">Б</span> </div> <div>             N &gt; Setpoint <span style="float: right;">Б</span><br/>             P sg &gt; 70 <span style="float: right;">Б</span><br/>             F &lt; 49 <span style="float: right;">Б</span><br/>             T1 &gt; 325 <span style="float: right;">Б</span> </div> </div> <div style="border: 2px solid yellow; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>                 MCP trip<br/>                 TDFWP trip<br/>                 Generator trip             </div> <div>                 PCR <span style="float: right;">Б</span><br/>                 N heat &gt; Setpoint<br/>                 MSV closed             </div> </div> </div> | <div style="text-align: center;"> <b>PP-2</b> <span style="float: right;">Б</span> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>             PP-2 deblock <input type="checkbox"/> </div> <div>             AUU deblock <input type="checkbox"/> </div> </div> <div style="margin-top: 10px;">             N &gt; Setpoint<br/>             P1 &gt; 165<br/>             CR drop         </div> | <div style="text-align: center;"> <b>AUU</b> <span style="float: right;">Б</span> </div> <div style="margin-top: 10px;">             AUU from CR<br/>             2 MCP trip<br/>             TDFWP trip<br/>             Generator trip<br/>             MSV closed         </div> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|            |              |            |              |                 |            |
|------------|--------------|------------|--------------|-----------------|------------|
| SG         | L SG1 > 39.5 | L SG1 < 22 | MSIV1 closed | MSSV SG1 opened | P SG1 > 84 |
|            | L SG2 > 39.5 | L SG2 < 22 | MSIV2 closed | MSSV SG2 opened | P SG2 > 84 |
| L SG1 > 62 | L SG3 > 39.5 | L SG3 < 22 | MSIV3 closed | MSSV SG3 opened | P SG3 > 84 |
| ↑ A II C   | L SG4 > 39.5 | L SG4 < 22 | MSIV4 closed | MSSV SG4 opened | P SG4 > 84 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div style="text-align: center;"> <b>MSC</b> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div>                 P mss &lt; 52 <span style="float: right;">Б</span> </div> <div>                 P mss &lt; 56<br/>                 P mss &gt; 62             </div> </div> | <div style="text-align: center;"> <b>1C</b> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div>                 L Press. &lt; 500<br/>                 L TY20B01 &gt; 1500             </div> <div>                 TK disbalance<br/>                 MSSV Press. opened             </div> </div> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Blocking:  
 Reg ☐ Blk ☐

Blinking rem. ☐

Deblocking ☐

CPS

TAB

1C

TK

TQ

TF

GRP

2C

PAR

3D

# Группы сигналов формата табло сигнализации

- АЗ (EP - emergency protection) – аварийная защита.
- ПЗ-1 (PP-1 - preventive protection 1) – предупредительная защита 1-го уровня.
- ПЗ-2 (PP-2 - preventive protection 2) – предупредительная защита 2-го уровня.
- УРБ (AUU - accelerated unit unloading) – ускоренная разгрузка блока.
- ПГ (SG - steam generators) - парогенераторы.
- ГПК (MSC - main steam collector) – главный паровой коллектор.
- 1К (1C - primary circuit) – первый контур.

## 3.7. Системы безопасности

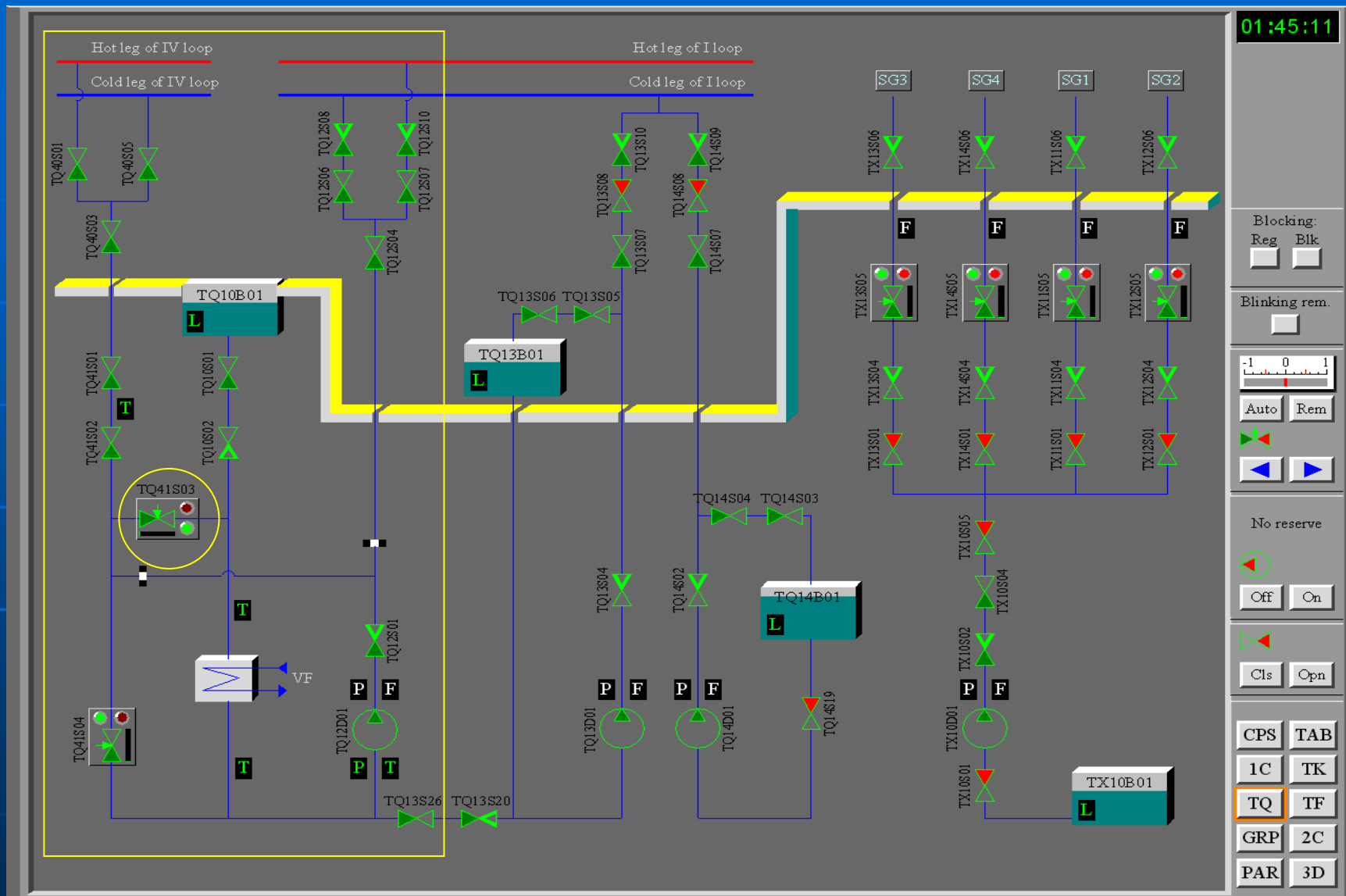
Системы безопасности не принимают участия в нормальных условиях эксплуатации реактора, но могут включать в себя компоненты систем нормальной эксплуатации.

Системы безопасности начинают работать когда оператор и система управления не могут удерживать параметры реакторной установки в установленных границах.

## В «КОС-А3» представлены следующие системы безопасности:

- Система (аварийного) расхолаживания.
- Система аварийного ввода бора (низкого и высокого давления).
- Система аварийного питания ПГ.
- Пассивная САОЗ.
- Система защиты от превышения давления в 1-ом контуре.
- Система защиты от превышения давления во 2-ом контуре.
- Система управления и защиты (рассмотрена выше).

### 3.7.1. Система (аварийного) расхолаживания



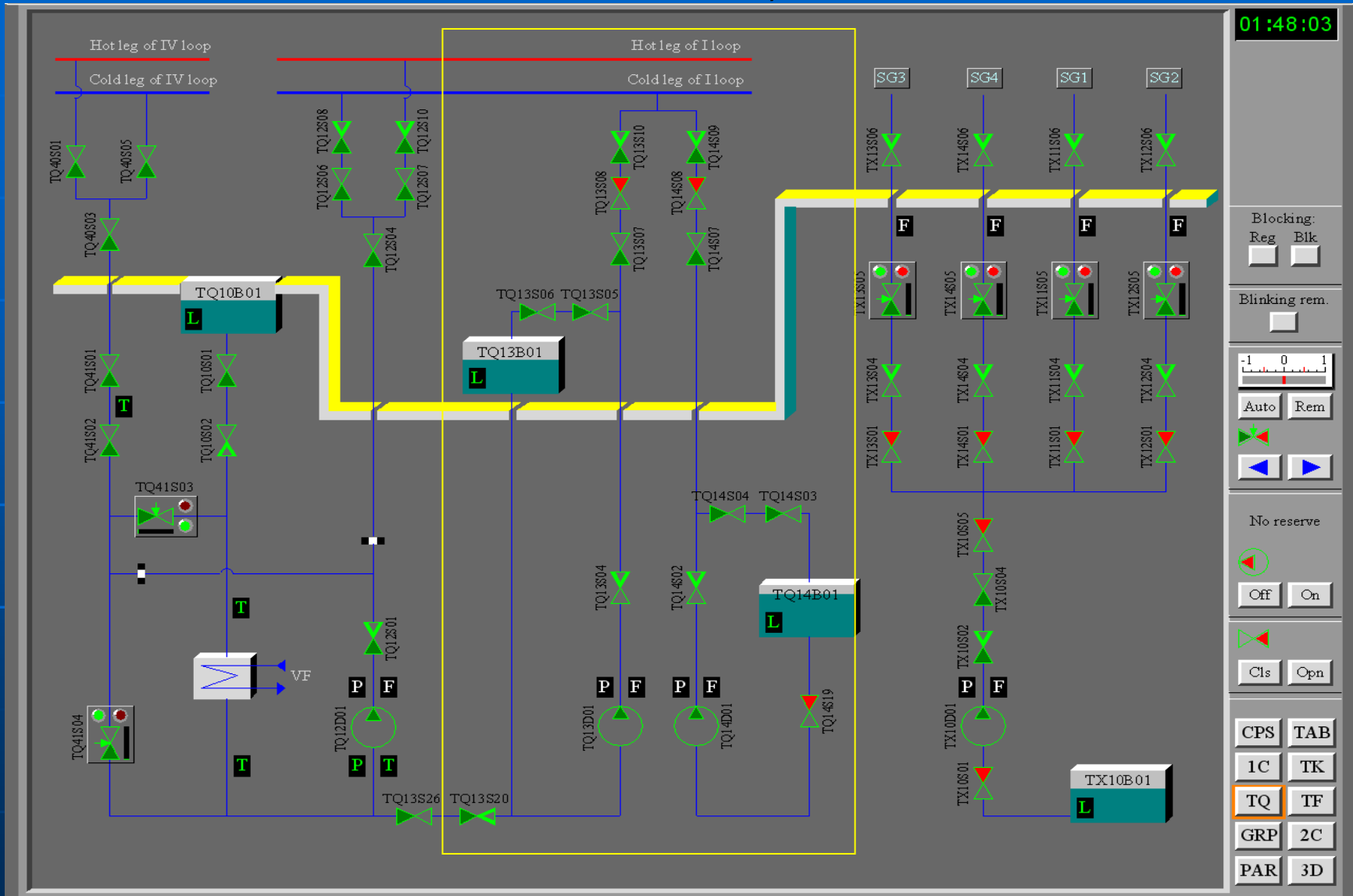
## Состав системы (аварийного) расхолаживания

- Теплообменник.
- Насос.
- Два автоматических регулятора.
- Линия соединения с баком, содержащем воду с высокой концентрацией бора системы борного регулирования.

## Работа системы (аварийного) расхолаживания

- При открытой задвижке TQ41S04 и закрытой TQ41S03 производится отбор теплоносителя 1-го контура из 4-ой петли ГЦК и возвращение его в 1-ю петлю минуя теплообменник.
- Открытием задвижки TQ41S03 (и закрытием задвижки TQ41S04) регулируется количество теплоносителя, проходящего через теплообменник.
- Возможна также подпитка бором или просто подача воды с высоким содержанием бора из бака TQ10B01.

### 3.7.2. Система аварийного ввода бора (низкого и высокого давления)

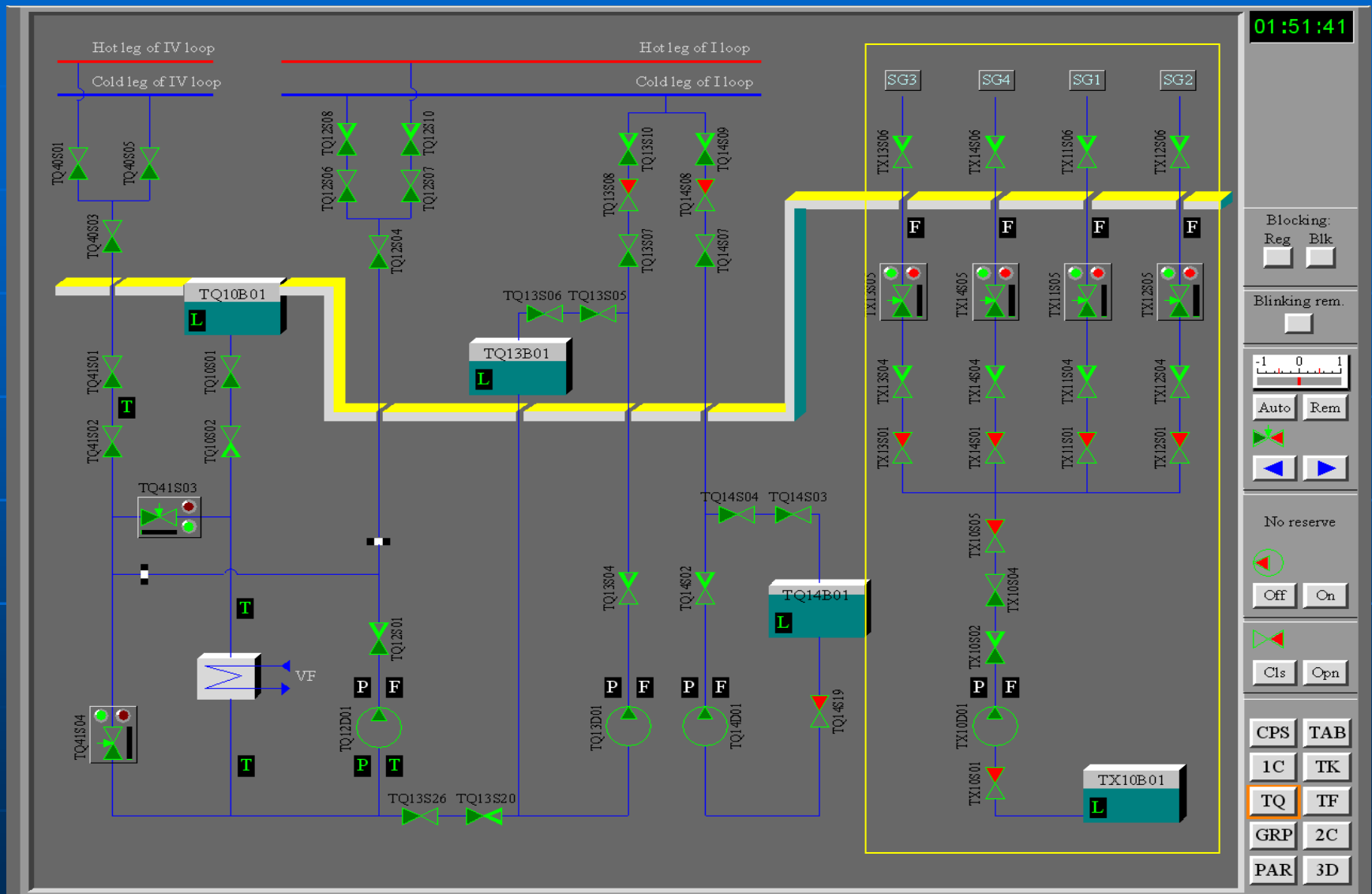


# Состав и назначение системы аварийного ввода бора

- Система аварийного ввода бора состоит из двух баков и двух насосов.
- Бак с низким давлением расположен внутри контеймента, бак высокого давления расположен вне контеймента.
- Система предназначена для подачи воды с высокой концентрацией бора в холодную нитку 1-ой петли ГЦК.



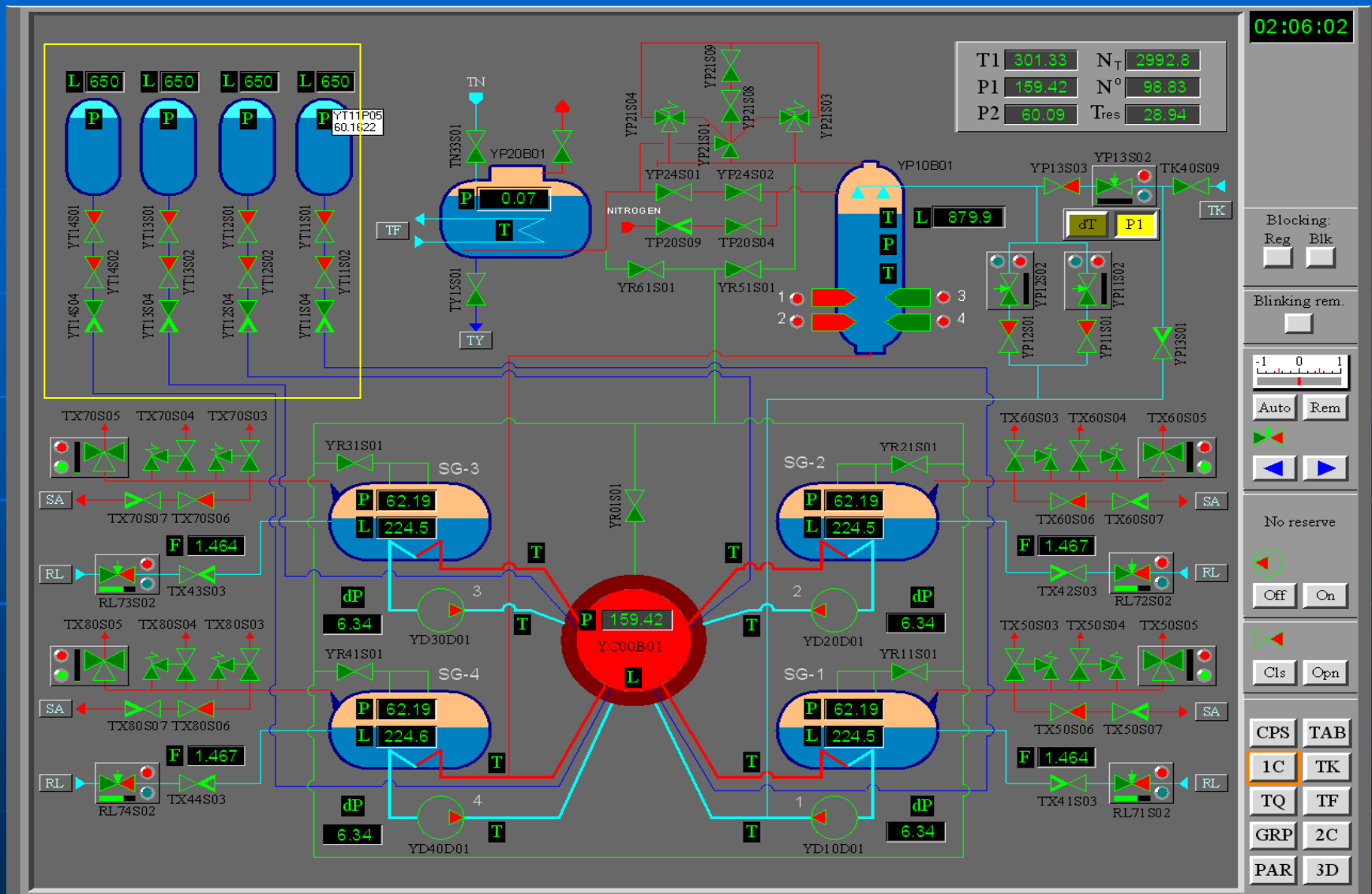
### 3.7.3. Система аварийного питания ПГ



# Состав системы аварийного питания ПГ

- Бак с теплоносителем.
- Нитка с насосом.
- Четыре индивидуальные нитки к четырём ПГ.
- Четыре автоматических регулятора.

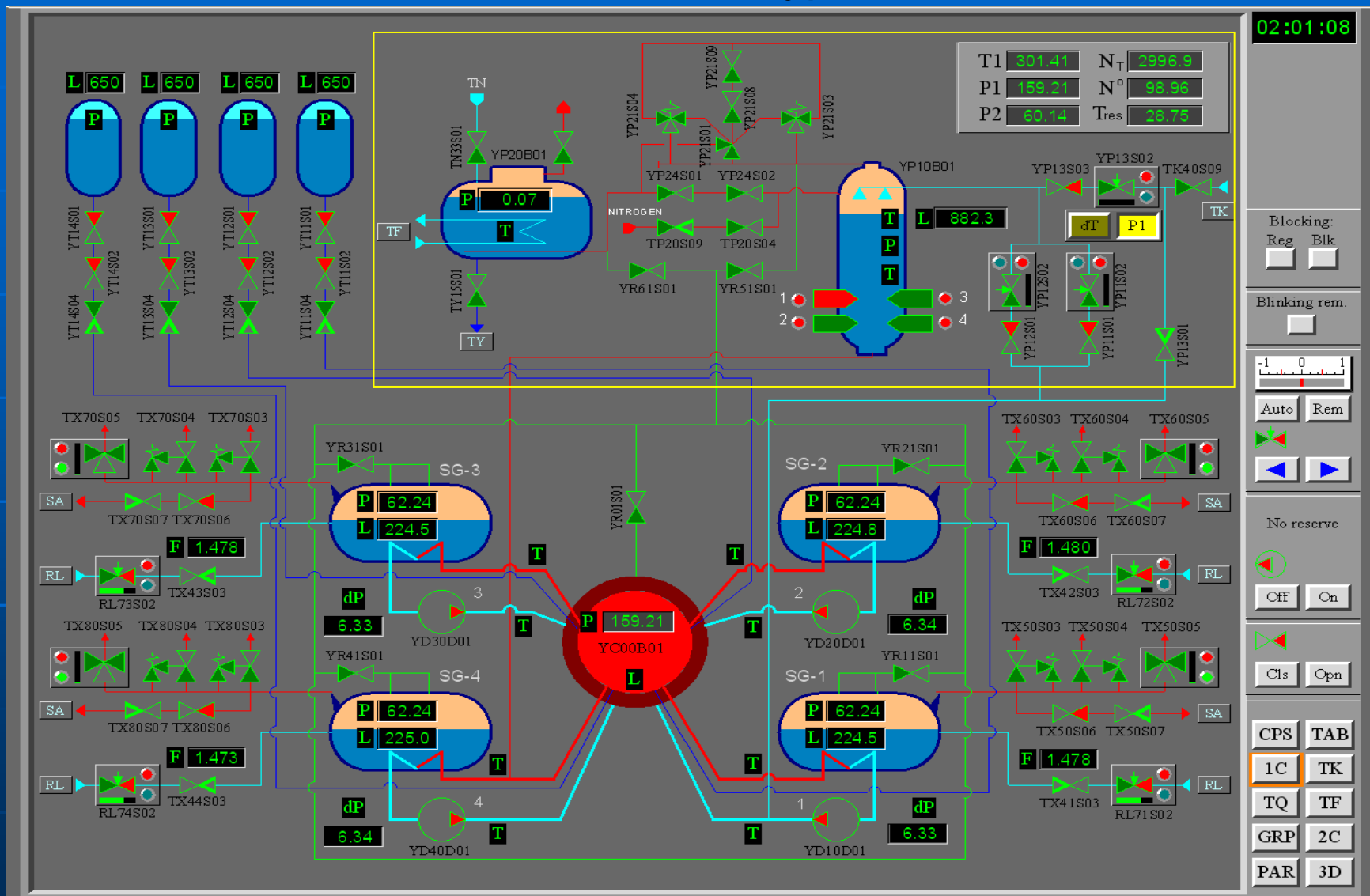
# 3.7.4. Пассивная САОЗ



# Состав и работа пассивной САОЗ

- Система состоит из четырёх баков с низким давлением.
- В случае падения давления в корпусе реактора ниже давления в баках, вода с высокой концентрацией бора начинает поступать в корпус реактора.  
Два трубопровода САОЗ врезаны выше обечайки, ещё два – ниже.

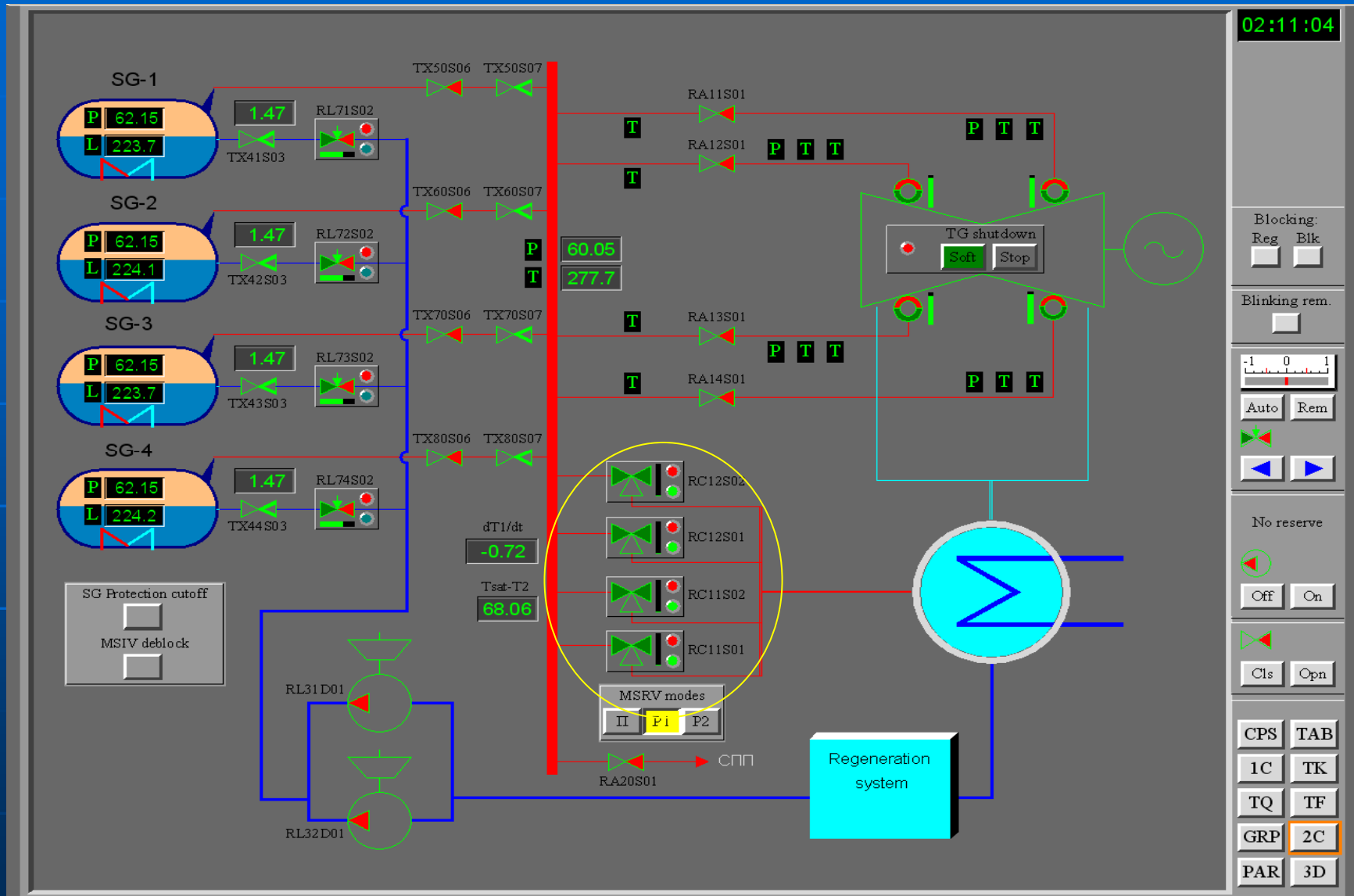
## 3.7.5. Система защиты от превышения давления в 1-ом контуре



# Система защиты от превышения давления в 1-ом контуре

- Предназначена для предотвращения превышения допустимого давления в корпусе реактора, КД и оборудовании 1-го контура.
- Система включает в себя импульсные предохранительные клапана на линии, соединяющей КД и барботер, и мембраны безопасности барботера.
- При превышении давления в 1-ом контуре более чем на 15% номинального, пар через разгрузочные клапана сбрасывается в барботёр.  
В случае дальнейшего роста давления в барботере разрушаются мембраны безопасности и пар сбрасывается в контеймент.

### 3.7.6. Система защиты от превышения давления во 2-ом контуре

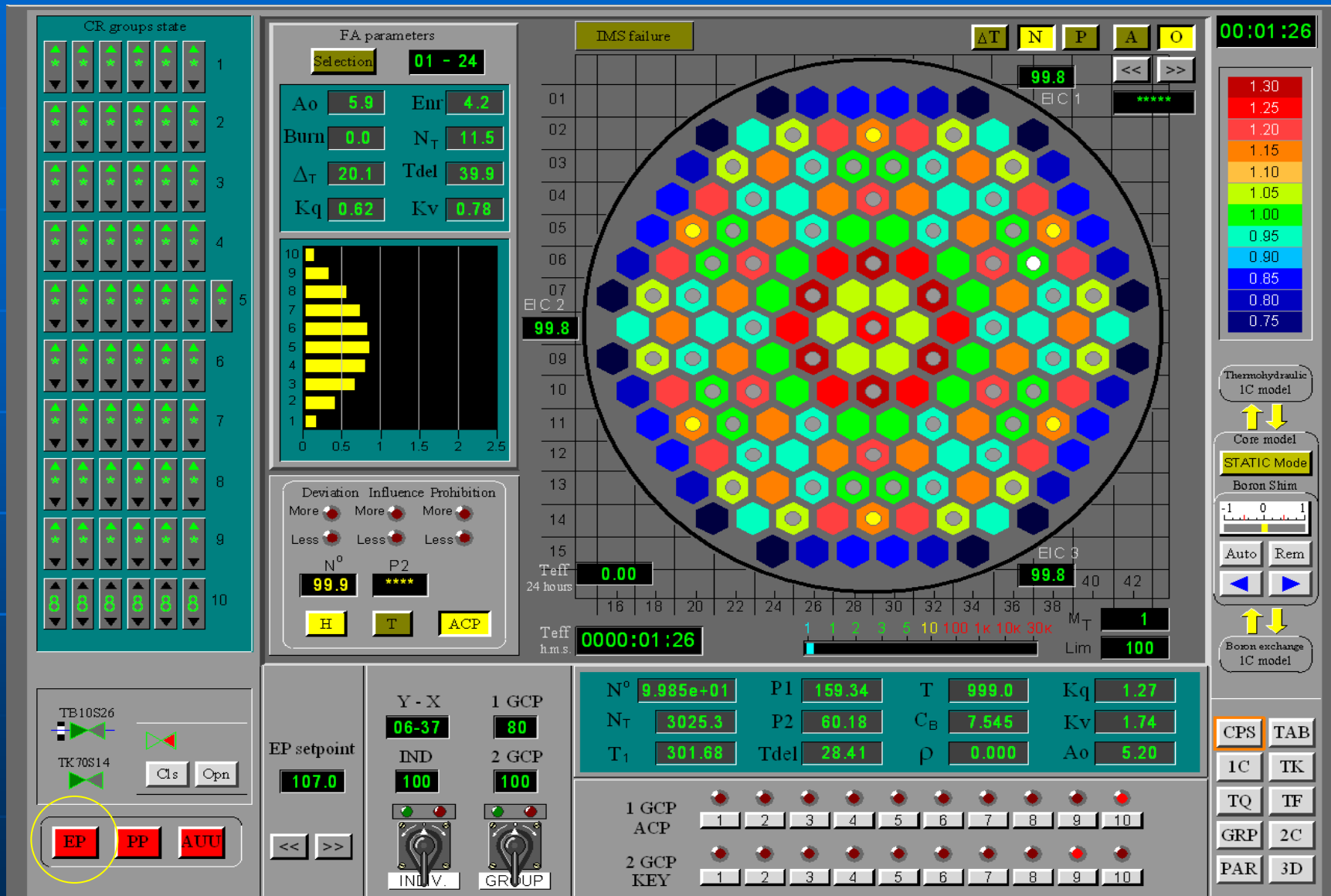


# Система защиты от превышения давления во 2-ом контуре

- Включает в себя разгрузочные клапана в конденсатор БРУ-К и в атмосферу БРУ-А (быстродействующее редуцирующее устройство).
- При нормальных условиях эксплуатации расход пара через турбину, а следовательно и ее нагрузку, давление в ГПК и ПГ, регулируют стопорные регулирующие клапана (СРК).  
При превышении установленного значения давления пар сбрасывается в конденсатор через БРУ-К, в случае дальнейшего роста давления, производится сброс пара в атмосферу через БРУ-А.



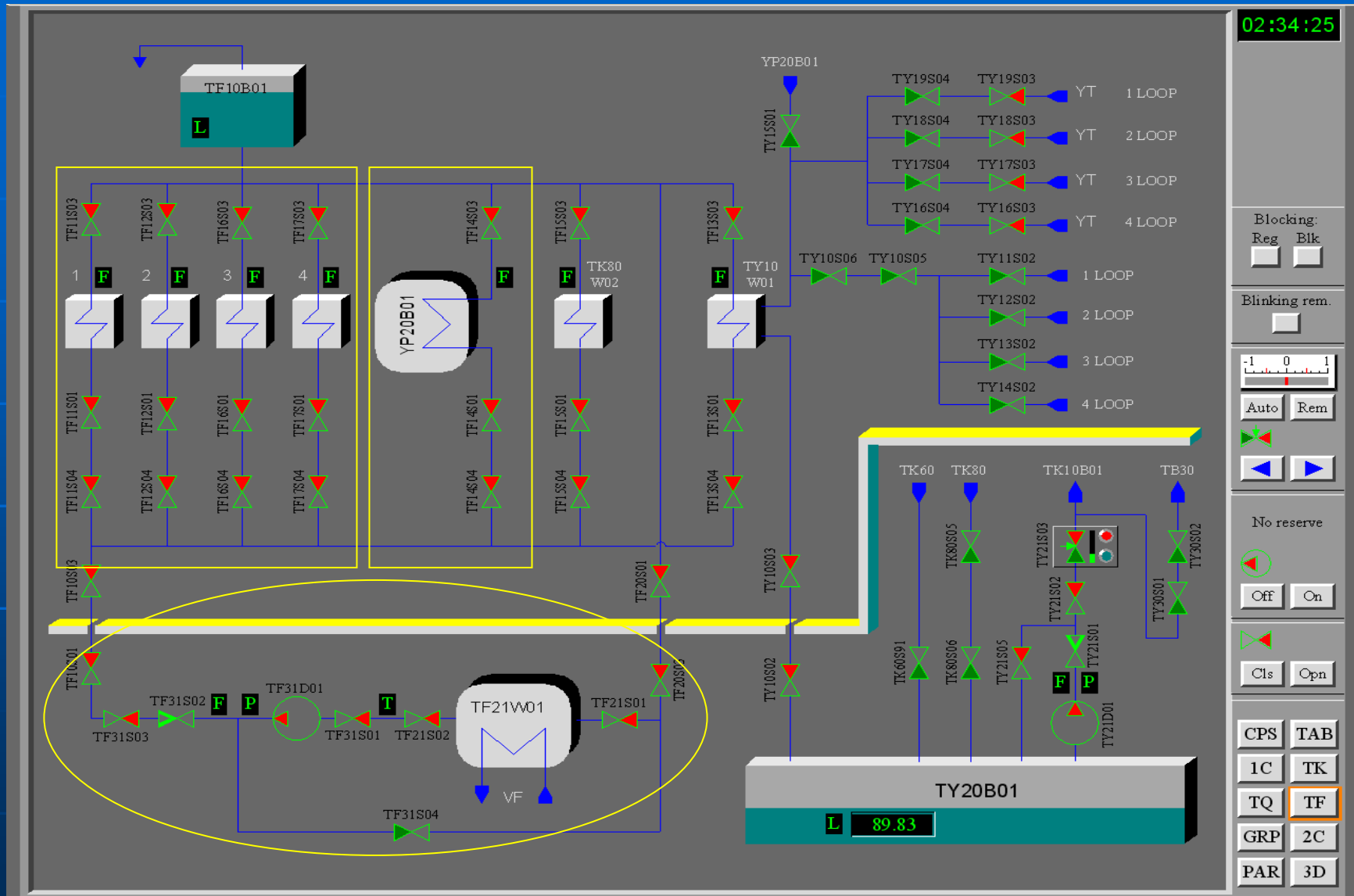
### 3.7.7. Система управления и защиты



### 3.8. Другие системы, представленные в «КОС-А3»

- Системы охлаждения ГЦН и барботёра.
- Системы оргпротечек.

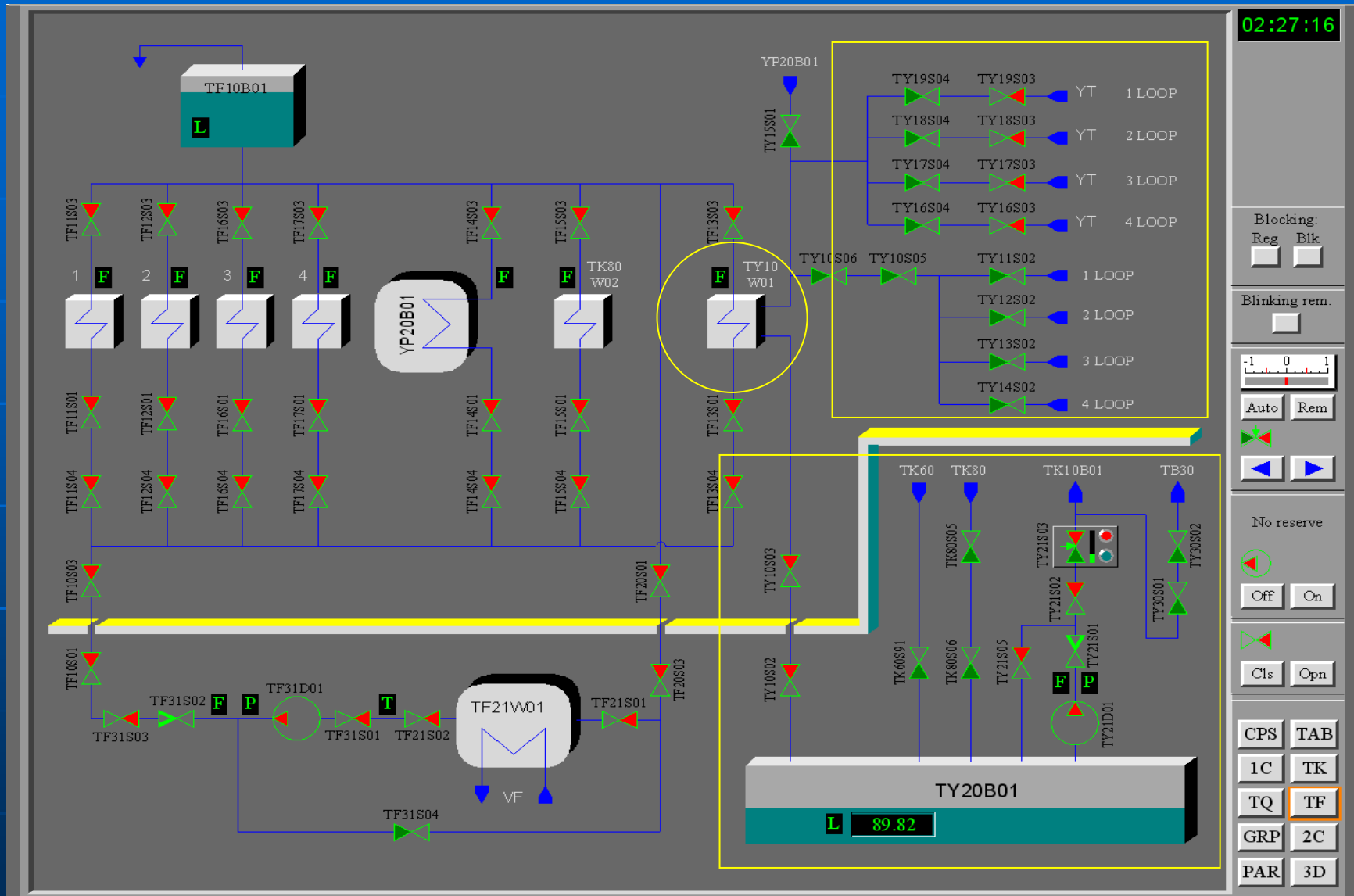
## 3.8.1. Системы охлаждения ГЦН и барботёра



# Состав и работа систем охлаждения ГЦН и барботёра

- Система охлаждения промконтура ГЦН (слева).  
Может быть отнесена к системам безопасности.  
При потере охлаждения промконтура ГЦН происходит, в конечном итоге, перегрев и отключение самих ГЦН.
- Теплообменник барботёра YP20B01 (справа).  
Может быть отнесён к системам безопасности.  
При превышении давления в барботёре разрушаются мембраны безопасности и пар сбрасывается в контеймент.
- Теплообменник, охлаждающий две указанные выше системы (внизу).

## 3.8.2. Системы оргпротечек



# Состав и работа систем оргпротечек

- Система оргпротечек внутри контеймента (верху).
- Теплообменник для охлаждения теплоносителя оргпротечек внутри контеймента.
- Система оргпротечек вне контеймента (внизу).
- Оргпротечки поступают в бак приёма оргпротечек ТУ20В01, из которого с помощью насоса они попадают либо в деаэратор подпитки, либо в баковое хозяйство ТВ30В01, а оттуда, в свою очередь, попадают в ГЦК (система ТК).

## 4. Перечень моделируемых режимов и явлений

### 4.1. Моделируемые режимы

- Нормальные условия эксплуатации РУ с ВВЭР-1000, включая пуск, останов и работу на номинальном уровне мощности.
- Нарушение нормальных условий эксплуатации, связанное с отказами различного оборудования, например, с остановом ГЦН, остановом ТПН, с закрытием различных задвижек.  
В случае устранимого отказа, например, после пуска остановившегося ГЦН, возможен выход на прежний уровень мощности РУ.

## 4.2. Моделируемые явления

- Переходные процессы на мгновенных и запаздывающих нейтронах.
- Ксеноновые переходные процессы, связанные с отравлением и разотравлением реактора при изменении уровня мощности активной зоны.
- Аксиальные и радиальные колебания пространственного распределения энерговыделения в активной зоне, связанные с ксеноновыми процессами.
- Отравление реактора самарием.
- Выгорание топлива в активной зоне реактора.
- Остаточное энерговыделение в активной зоне.



## 5. Перечень и характеристика моделей, входящих в состав тренажера

- Модель нейтронной кинетики активной зоны.  
Является ручным кодом. Основные характеристики:
  - одnogрупповое диффузионное приближение
  - шесть групп запаздывающих нейтронов
  - статический и динамический расчёт
  - трехмерный расчёт, одна точка на ТВС в плане и 10 по высоте активной зоны
  - модели динамики ксенона и самария, выгорания топлива и остаточного энерговыделения в топливе
- Модель БИК.  
Ручной код. Основные характеристики:
  - расчёт потока нейтронов в местах расположения камер
  - расчёт периода и реактивности по показаниям камер

- Модель тепло-гидравлики активной зоны.  
Ручной код. Основные характеристики:
  - гомогенная модель на трёх уравнениях
  - статический и динамический расчёт
  - трехмерный расчёт, одна точка на ТВС в плане и 10 по высоте активной зоны
- Тепло-гидравлические модели ЯЭУ: трубопроводы, задвижки, насосы, баки, ПГ, турбина и др.  
Ручной код. Гомогенные модели на трёх уравнениях.
- Модель АСУ ТП АЭС с реактором ВВЭР-1000.  
САПР логических схем автоматики.

## 6. Инструментальные средства поддержки работы тренажера

### Характеристика программной платформы «ЭНИКАД»

- Среда разработки и поддержки работы тренажера.
- Возможность интегрировать ручные коды.
- Оболочка и среда разработки САПР логических, тепло-гидравлических и электрических моделей.
- Возможность отображения результатов моделирования.
- Возможность управления процессом моделирования в интерактивном режиме.
- Возможность создания учебных задач, включая заранее predetermined сценарии прохождения задачи.
- Возможность сохранения результатов моделирования (протоколирование) и их последующий анализ.
- Основными компонентами «ЭНИКАД» являются «GIW» и «ПЗ».

## 6.1. Графический интерфейс модели «GIW»

Содержит три основных элемента, позволяющих отображать результаты моделирования:

- «Таблица» - отображение текущих значений переменных модели (имя и значение).
- «График» - отображение зависимости переменных модели от времени.
- Экранный «Формат», который в дополнение к первым двум компонентам может отображать данные в виде цветовой 2D и 3D графики.

Позволяет управлять моделью в диалоговом режиме:

- Элемент «Таблица» позволяет вводить новые значения переменных, являющихся входными для моделей в составе тренажера.
- Элемент «Формат» может содержать различные динамические элементы, например, кнопки, позволяющие управлять соответствующими им переменными модели.

## 6.2. Планировщик заданий «ПЗ»

- Предназначен для создания учебных задач в offline режиме.
- Позволяет выбрать модель, например, топливную загрузку, из имеющихся.
- Для каждой модели позволяет определить
  - начальное состояние
  - сценарий (заранее заданную последовательность воздействий на модель)
  - список переменных и файл для протоколирования результатов моделирования (выполнения учебной задачи)

## 7. Характеристика решаемых на тренажёре задач

- В комплект поставки тренажера входит фиксированный перечень учебных задач, каждая из которых детально описана в документации, поставляемой вместе с тренажером.
- В комплект поставки входят две «модели», различающиеся топливной загрузкой активной зоны. Представлены первая (свежая) и пятая (стационарная) загрузки для трёхлетнего топливного цикла реактора ВВЭР-1000.
- Учебные задачи универсальны относительно модели тренажера.
- Учебные задачи можно разделить на три логических группы.

# Группы учебных задач

- Задачи А-Е демонстрирует работу РУ ВВЭР-1000 при различных отказах оборудования 1-го и 2-го контура, например, при останове ГЦН.
- Задача F состоит в возврате реактора на номинальный уровень мощности из состояния горячий останов после падения АЗ.
- Задачи G-J демонстрируют различные физические явления в активной зоне: влияние топливной загрузки на распределение поля энерговыделения в активной зоне, значения коэффициентов и эффектов реактивности, ксеноновые колебания в активной зоне.



# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-А3»

Часть 2.  
Демонстрация функциональных  
возможностей тренажера и решаемых на  
тренажере задач.

# Содержание части 2

1. Введение.
2. Установка и удаление тренажера.
3. Пуск тренажера.
4. Выбор учебной задачи.
5. Запуск, останов и выход из учебной задачи.
6. Основное управление тренажером.
7. Анализ протокола учебной задачи.
8. Экранные «Форматы» тренажера.
9. Перечень и описание учебных задач.
10. Демонстрация учебных задач.

# Аналитический тренажер ЯЭУ с ВВЭР-1000 «КОС-А3»

## Часть 3. Практические занятия на тренажере.

# Содержание части 3

1. Задача «F»: Пуск реактора из состояния горячий останов после срабатывания аварийной защиты на 100% мощности.
2. Задача «A». Заклинивание ГЦН-1 на 100% мощности.
3. Задача «B». Закрытие БЗОК на ПГ-1 на 100% мощности.
4. Задача «C». Останов ГЦН-2 от ключа на 100% мощности.
5. Задача «C+». Возврат на 100% мощности после останова ГЦН-2 от ключа.