

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»
Інститут енергетики
Кафедра атомних електричних станцій

Методичні вказівки
до виконання курсової роботи
з навчальної дисципліни
«Експлуатація АЕС»

для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності
143 - «Атомна енергетика» усіх форм навчання

Одеса
«Одеська політехніка»
2022

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація АЕС» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 143 - «Атомна енергетика» усіх форм навчання / Укладачі: В.П. Кравченко, Ю.О. Комаров, Я.О. Комарова – Одеса, «Одеська політехніка», 2022. – 36 с.

Перелік укладачів:

Кравченко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри АЕС

Комаров Юрій Олексійович, доктор технічних наук, доцент кафедри АЕС

Комарова Ярослава Олегівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри АЕС

Рецензент:

Скалозубов Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри АЕС

Затверджено на засіданні кафедри АЕС Інституту енергетики Національного університету «Одеська політехніка»,
протокол № 4 від 23.11.2022

Зміст

Вступ	4
1. Розрахунок теплової потужності реактора	5
1.1. За параметрами першого контуру	5
1.2. За параметрами в парогенераторах	6
1.3. За показниками АКНП	7
1.4. Середньозважена значення теплової потужності реактора	8
2. Розрахунок електричної потужності турбогенератора	9
3. Розрахунок теплового балансу між першим та другим контурами	10
4. Розрахунок зміни рівня в компенсаторі тиску	11
5. Розрахунок параметрів теплообмінника системи підживлення-скидання	12
6. Визначення тривалості подавання борного концентрату	14
7. Короткий опис схем та обладнання, що задіяно у курсовій роботі	16
7.1. Перший контур	16
7.2. Реактор	17
7.3. Апаратура контролю нейтронного потоку	19
7.4. Головний циркуляційний насос	20
7.5. Парогенератор	21
7.6. Компенсатор тиску	22
7.7. Турбоустановка та другий контур	24
7.8. Система підживлення-продування ТК	25
7.9. Система промконтуру ТФ	26
8. Загальна процедура виконання курсової роботи	29
9. Оформлення та здача курсової роботи	33
9.1 Оформлення курсової роботи	33
9.2 Захист курсової роботи	33
9.3 Критерії оцінювання	34
Література	35
Додаток А Титульний аркуш курсової роботи	36

Вступ

Дисципліна "Експлуатація АЕС" – одна з профільних дисциплін в підготовці магістрів зі спеціальності атомна енергетика.

Предметом дисципліни є процес експлуатації атомної електростанції, тобто експлуатаційні засади основної цілі існування АЕС – безпечного видобутку електроенергії.

Протягом оволодіння дисципліною здобувач вищої освіти має оволодіти знаннями щодо взаємодії усього комплексу обладнання та систем, які задіяні у безпечному видобутку електроенергії. Має розуміти процеси, які відбуваються при взаємодії різного обладнання, розуміти взаємний вплив станів обладнання, навчитись визначати різні стани обладнання та керувати процесом безпечного видобутку електроенергії на енергоблоку АЕС з реакторною установкою (РУ) типу ВВЕР-1000.

Цієї меті, в окремої, слугує виконання здобувачами вищої освіти курсової роботи.

Завданням курсової роботи є спрощений теплогідравлічний розрахунок основного обладнання першого контуру, другого контуру та ряду допоміжного обладнання систем на різних рівнях потужності з використанням багатофункціонального тренажера РУ з ВВЕР-1000 (WWER-1000 Reactor Simulator).

Курсова робота виконується здобувачами вищої освіти самостійно.

Протягом виконання курсової роботи здобувач вищої освіти має виконати:

- задані перехідні процеси на тренажері РУ з ВВЕР-1000;
- розрахунки потужності реактора, парогенератора, турбогенератора;
- розрахунок зміни рівня в компенсаторі тиску;
- розрахунок параметрів середовищ для теплообмінника допоміжної системи підживлення-продування;
- розрахунок тривалості часу подавання борного концентрату для досягання необхідної концентрації борної кислоти у теплоносії першого контуру РУ.

Основні вихідні данні для розрахунків мають бути взяті з тренажера. Результати розрахунків порівнюються з результатами, отриманими в тренажері (за можливості). Після кожного розрахунку робиться висновок про збігання або розбіжності в результатах, що отримані в тренажері та розрахунковим шляхом.

Курсова робота оформлюється за звичайними вимогами.

Курсова робота має бути захищена. На захисті здобувач вищої освіти має продемонструвати, що всі завдання були виконані самостійно та коректно. Також на захисті здобувач вищої освіти має продемонструвати теоретичні знання розглянутих процесів.

1. Розрахунок теплової потужності реактора

Теплова потужність реактора (а точніше теплова потужність активної зони реактора) має велике значення у забезпеченні безпечної експлуатації АЕС. Відповідно до теплової потужності дозволяються або забороняються ті чи інші режими роботи та стани реакторної установки. Тому теплова потужність реактора на реальному енергоблоці визначається п'ятьма способами. У цій роботі ми розглянемо три з цих способів.

1.1. За параметрами першого контуру

Теплова потужність за параметрами першого контуру розраховується на основі витрати ГЦН та ступеню нагрівання у активній зоні реактора за виразом:

$$N_{1k} = \rho \cdot G \cdot c_p \cdot (t_{r1} - t_{r2})$$

де N_{1k} – теплова потужність ядерного реактора, що визначається я по параметрам першого контуру, кВт;

ρ – густина теплоносія першого контуру, кг/м³;

G – об'ємна витрата теплоносія першого контуру (від усіх ГЦН), м³/с;

c_p – середня питома теплоємність теплоносія першого контуру, кДж/(кг · °С);

t_{r1} , t_{r2} – температура теплоносія першого контуру на виході з ядерного реактора та на вході відповідно, °С.

Вихідні дані для розрахунку взяти з екрану ІС тренажера (див. Рисунок 1.1) та з опису ГЦН витрата насоса (див. розділ 7).

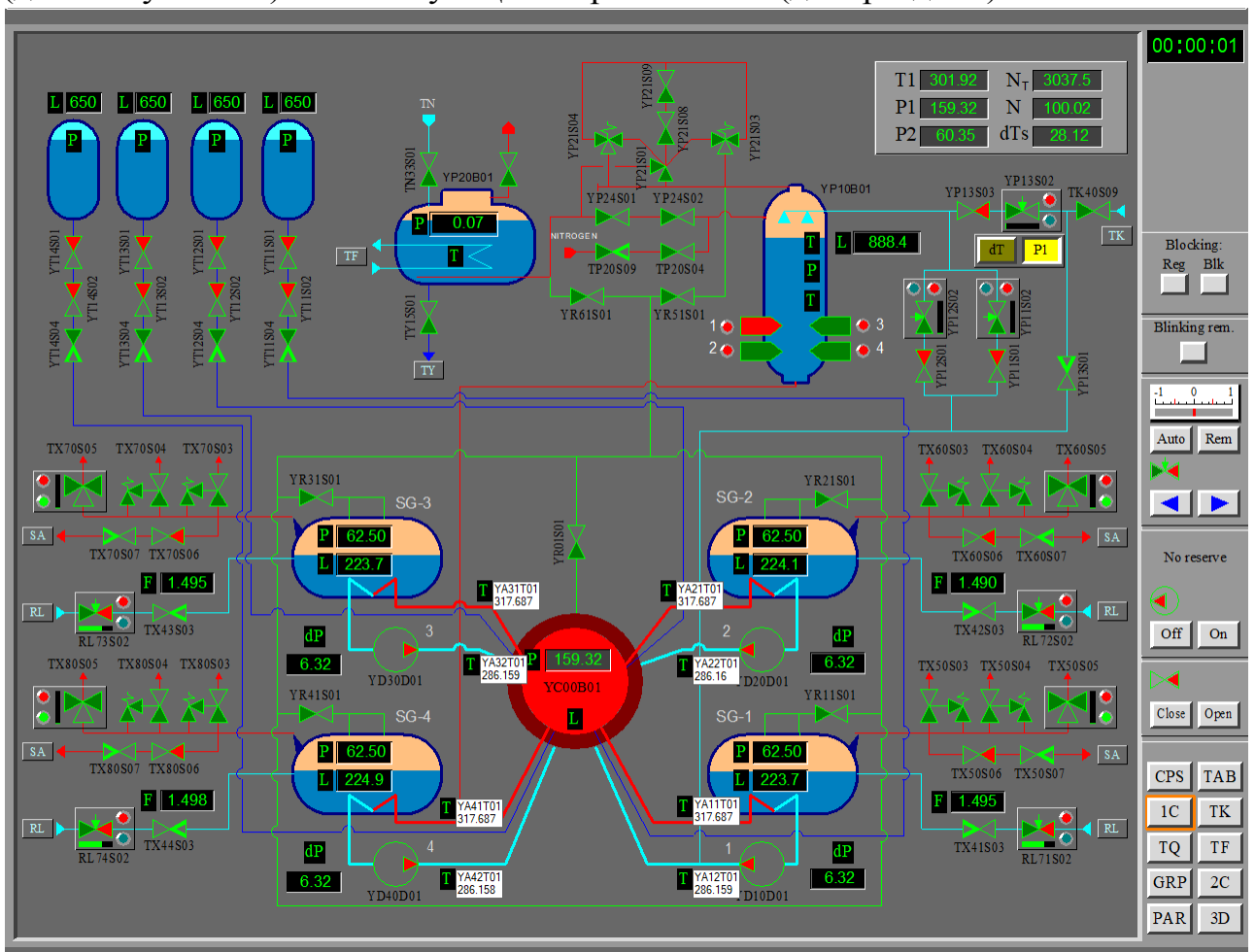


Рисунок 1.1 – Екран ІС тренажера

1.2. За параметрами в парогенераторах

Теплова потужність реактора за параметрами в парогенераторах (ПГ) розраховується на основі витрати живильної води та параметрів (температури та тиску) середовища на вході та на виході з ПГ за виразом:

$$N_{\text{пг}} = \sum_{i=1}^4 \left(G_{mvi} (h_{\text{pari}} - h_{\text{vdi}}) \right)$$

де $N_{\text{пг}}$ – теплова потужність ядерного реактора, що визначається за потужністю парогенераторів (за параметрами в ПГ), кВт;

G_{mvi} – масова витрата живильної води на i -й парогенератор, кг/с;

h_{pari} – ентальпія пари на виході з i -го парогенератора, кДж/кг;

h_{vdi} – ентальпія живильної води на вході в i -й парогенератор, кДж/кг.

Вихідні данні для розрахунку взяти з екрану 1С тренажера (див. Рисунок 1.1) та з опису ПГ - температура живильної води на вході і ПГ (див. розділ 7).

1.3. За показниками АКНП

Теплову потужність реактора можливо оцінити за даними з іонізаційних камер (ІК) апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП) за виразом:

$$N_{aknp} = \frac{N_{nom}}{300} \cdot \sum_{i=1}^3 N_i$$

де N_{aknp} – теплова потужність ядерного реактора, визначена за показаннями ІК АКНП, МВт;

N_{nom} – номінальна потужність РУ, МВт ($N_{nom} = 3040$ МВт);

N_i – потужність по ІК АКНП, %.

Вихідні данні для розрахунку взяти з екрану CPS тренажера (див. Рисунок 1.2).

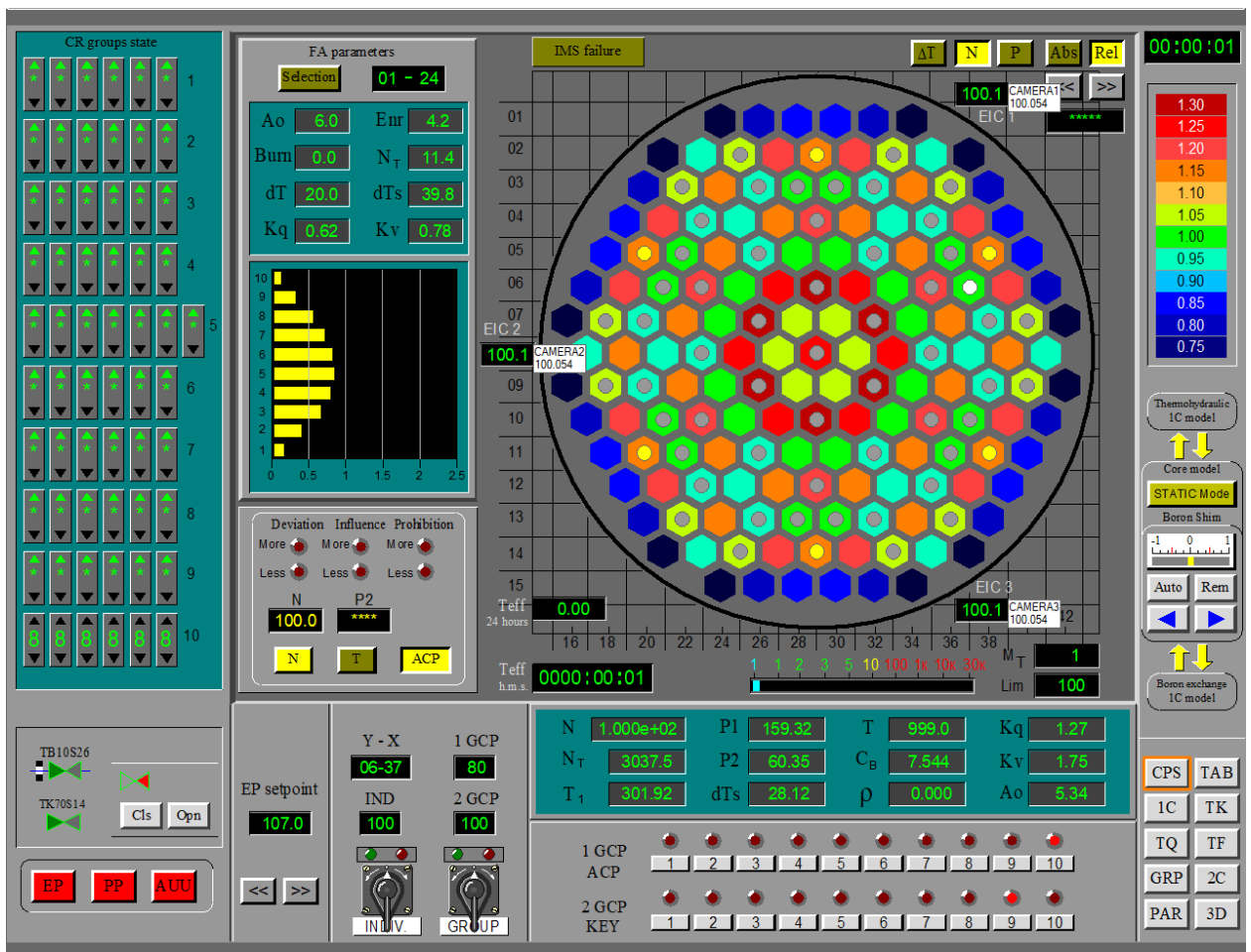


Рисунок 1.2 – Екран CPS тренажера

1.4. Середньозважена значення теплової потужності реактора

Остаточне визначення теплової потужності реактору виконується за допомогою середньозваженої оцінки за виразом:

$$N_p = \frac{k_1 N_{1k} + k_2 N_{пг} + k_3 N_{акнр}}{k_1 + k_2 + k_3}$$

де N_p – середньозважене значення теплової потужності активної зони реактора, МВт;

N_{1k} – теплова потужність ядерного реактора, визначена за параметрами першого контуру, МВт;

$N_{пг}$ – теплова потужність ядерного реактора, визначена за параметрами в парогенераторах, МВт;

$N_{акнр}$ – теплова потужність ядерного реактора, визначена за показаннями іонізаційних камер АKNП, МВт;

k_1, k_2, k_3 – вагові коефіцієнти для кожного способу вимірювання теплової потужності.

Виходячи з досвіду експлуатації встановлено, що:

- для стаціонарних режимів найбільш достовірним є значення теплової потужності, що отримані за параметрами в ПГ. Найменш точним є визначення за показаннями іонізаційних камер АKNП;

- для перехідних режимів з динамічною зміною потужності ядерного реактора найбільш точними є визначення за показаннями іонізаційних камер АKNП, а показники, отримані за параметрами в ПГ є дуже інерційні і тому при динамічних змінах мають велику похибку.

У зв'язку з цим, вагові коефіцієнти для кожного способу вимірювання теплової потужності у реальній системі вимірювання змінюють свої значення в залежності від того стаціонарний це режим, або перехідний.

Вихідні данні для k_1, k_2, k_3 наведені в таблиці.

Ваговий коефіцієнт	Значення для стаціонарного режиму	Значення для динамічного режиму
k_1	17	17
k_2	67	10
k_3	10	67

2. Розрахунок електричної потужності турбогенератора

Визначення електричної потужності в даній роботі носить дуже приблизний характер, оскільки модель другого контуру в тренажері, що використовується (WWER-1000 Reactor Simulator) дуже спрощена, а електрична частина взагалі відсутня.

Потрібно розрахувати електричну потужність турбогенератора без урахування проміжної сепарації, перегріву пари та відборів на систему регенерації теплоносія другого контуру.

У цьому випадку електрична потужність турбогенератора визначається витратою пари, теплоперепадом, що спрацьовується у циліндрах турбіни та різними втратами за виразом:

$$N_{et} = G_{mv}(h_1 - h_2)\eta$$

де N_{et} – електрична потужність турбогенератора, кВт;

G_{mv} – масова витрата живильної води на всі ПГ, кг/с;

h_1 – ентальпія пари на вході в турбіну, кДж/кг;

h_2 – ентальпія пари на виході з турбіни, кДж/кг;

η – втрати тепла (коефіцієнт корисної дії турбогенератора) прийняти 0,6.

Вихідні данні для розрахунку взяти з екрану 2С тренажера (див. Рисунок 2.1) та з опису турбоустановки тиск у паровому об'ємі конденсатора турбіни (див. розділ 7).

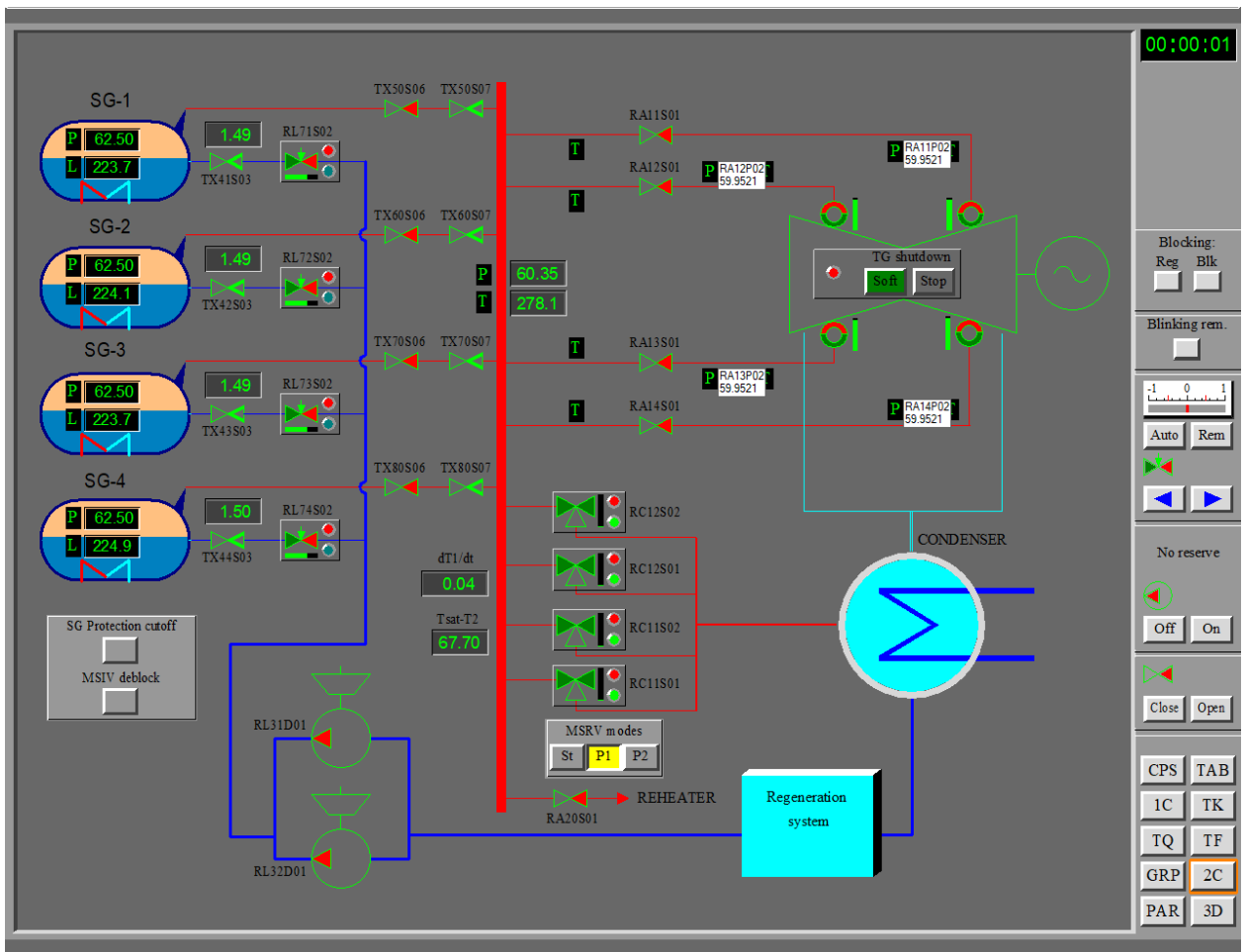


Рисунок 2.1 – Екран 2С тренажера

3. Розрахунок теплового балансу між першим та другим контурами

Відповідно до закону збереження енергії вся (якщо знехтувати втратами тепла в енергоустановці та підведенням тепла від працюючих ГЦН) теплова потужність ядерного реактора передається робочому тілу в парогенераторі.

Передача тепла буде більш значною при більшій різниці між температурою теплоносія першого контуру і водою у ПГ. Оскільки пара в ПГ знаходиться в стані насичення, то зміна тиску в ПГ призводить до зміни температури робочого середовища в ПГ (по другому контуру).

У цих умовах підвищення тиску в ПГ приводить до зниження відводу тепла від теплоносія першого контуру. При зниженні тиску у ПГ тепловідвід від першого контуру збільшується – охолодження першого контуру прискорюється.

Вказану закономірність можна визначити наступним чином:

$$N_{\text{пр}0} = N_{\text{р}0} = K \cdot F \cdot (t_{\text{тср}} - t_{\text{сII}})$$

де $N_{\text{р}0}$ – теплова потужність реактору, кВт;

$N_{\text{пр}0}$ – теплова потужність усіх парогенераторів, кВт;

K – коефіцієнт теплопередачі у парогенераторі, кВт/(м² · К);

F – сумарна площа поверхні теплопередачі чотирьох парогенераторів, м²;

$t_{\text{тср}}$ – середня температура теплоносія першого контуру, °С;

$t_{п}$ – середня температура середовища в ПГ (температура насичення при тиску пари, що генерується), °C.

Для даного розрахунку приймемо, що коефіцієнт теплопередачі у парогенераторі є незмінною величиною, що дорівнює $K = 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Інші вихідні данні для розрахунку взяти з екрану 1С тренажера (див. Рисунок 1.1) та з описання ПГ (площа поверхні теплопередачі) (див. розділ 7).

4. Розрахунок зміни рівня в компенсаторі тиску

При змінах температури теплоносія першого контуру відбувається зміна рівня в компенсаторі тиску (КТ).

При збільшенні температури теплоносія першого контуру густина зменшується, теплоносій у першому контурі займає більший об'єм, який по дихальному трубопроводу надходить до КТ і збільшує у ньому рівень.

При зменшенні температури теплоносія першого контуру густина збільшується, теплоносій займає менший об'єм, що компенсується витіканням (по дихальному трубопроводу) з КТ додаткового об'єму теплоносія, що призводить до зменшення рівня у КТ.

Зміну об'єму теплоносія першого контуру при зміні тиску та температури можна визначити за виразом:

$$\Delta V = V_{1k} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)$$

де: V_{1k} – геометричний об'єм першого контуру (який нормально заповнено теплоносієм при поточних значеннях тиску та температури), м^3 ;

ρ_0 – густина теплоносія першого контуру при поточних значеннях тиску та температури, кг/м^3 ;

ρ_1 – густина теплоносія першого контуру при нових (змінених) значеннях тиску і температури, кг/м^3 ;

Можливий знак мінус у значенні ΔV свідчить про зменшення об'єму теплоносія в КТ, знак плюс – про збільшення.

Зміна об'єму і рівня в КТ пов'язана залежністю

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Delta l.$$

Звідси вираз для зміни рівня КТ має вигляд:

$$\Delta l = \frac{4 \cdot \Delta V}{\pi \cdot D^2}$$

де Δl – значення зміни рівня в КТ, м;

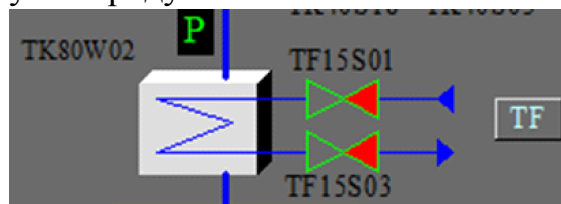
ΔV – значення зміни об'єму теплоносія першого контуру при зміні його тиску та температури, м^3 ;

D – внутрішній геометричний діаметр КТ, м.

Вихідні данні для розрахунку взяти з екрану 1С тренажера (див. Рисунок 1.1) до та після перехідного процесу. Інші данні взяти з описання першого контуру (значення V_{1k}) та з описання КТ (значення D) (див. розділ 7).

5. Розрахунок параметрів теплообмінника системи підживлення-скидання

Проведемо розрахунок параметрів середовищ для поверхневого теплообмінника, встановленого у системі підживлення-продування ТК. А саме розглянемо доохолоджувач продування ТК80W02.



Гарячим середовищем в цьому теплообміннику виступає теплоносіє першого контуру, який охолодився у регенеративному теплообміннику ТК80W01 та має бути додатково охолоджений до низьких температур (до 60°C) для нормальної роботи іонообмінних фільтрів системи СВО-2.

Холодним середовищем, що має охолодити теплоносіє першого контуру є вода системи промконтуру ТФ. Проходячи через теплообмінник ТК80W02, вода системи ТФ нагрівається.

Балансове рівняння для поверхневого теплообмінника має вигляд:

$$G_1(h_1' - h_1'') \cdot \eta = G_2(h_2'' - h_2')$$

де G_1 – витрата гарячого теплоносія, кг/с;

G_2 – витрата холодного теплоносія, кг/с;

h_1' – початкова ентальпія гарячого теплоносія, кДж/кг;

h_1'' – кінцева ентальпія гарячого теплоносія, кДж/кг;

h_2' – початкова ентальпія холодного теплоносія, кДж/кг;

h_2'' – кінцева ентальпія холодного теплоносія, кДж/кг;

η – коефіцієнт втрат (ККД теплообмінника).

Завдання: розрахувати температуру теплоносія першого контуру на вході у теплообмінник ТК80W02.

Вихідні данні:

Температуру охолоджувальної води системи ТФ на виході з теплообмінника ТК80W02 прийняти рівною 35 град.

Коефіцієнт втрат (ККД теплообмінника) $\eta = 0,9$.

Інші дані для розрахунку взяти з екрану ТК тренажера (див. Рисунок 5.1) та екрану ТФ тренажера (див. Рисунок 5.2).

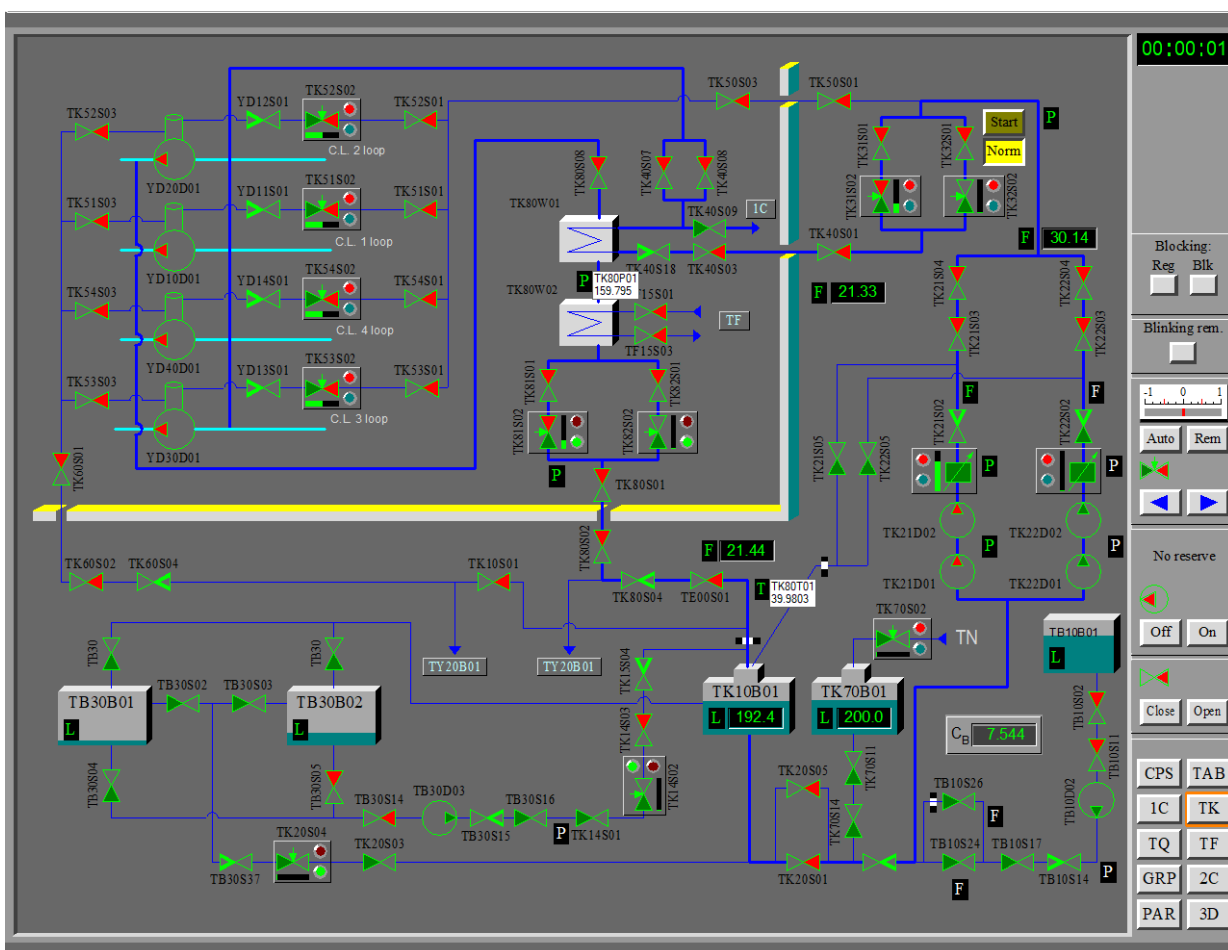


Рисунок 5.1 – Экран ТК тренажера

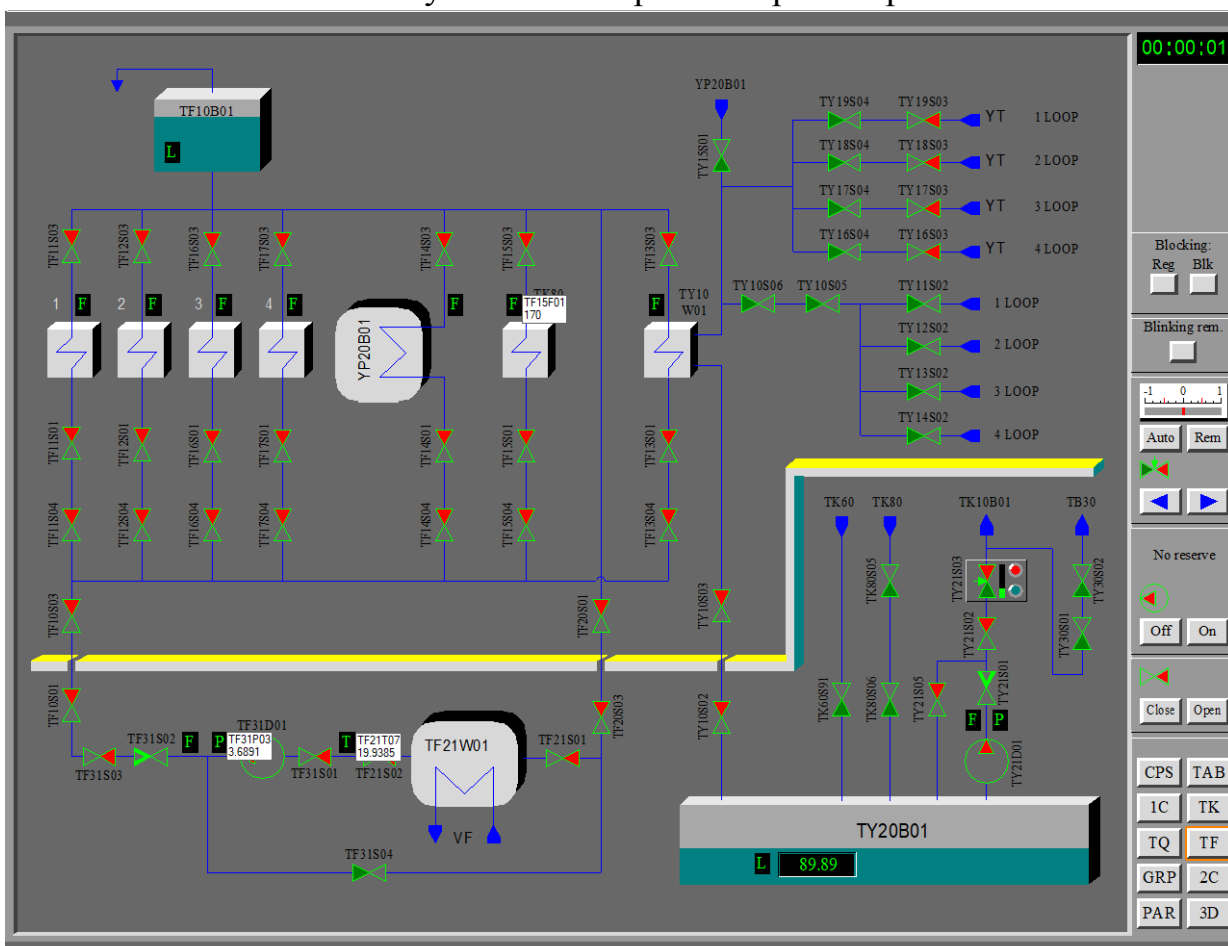


Рисунок 5.2 – Экран TF тренажера

6. Визначення тривалості подавання борного концентрату

Зміна концентрації борної кислоти у теплоносії першого контуру є звичайним технологічним процесом при експлуатації енергоблоку АЕС. Підвищення концентрації борної кислоти проводиться за допомогою системи підживлення-продування ТК. Подача борного концентрату з концентрацією 40 г/дм³ від баку ТВ10В01 дозволяє поступово збільшити концентрацію борної кислоти у першому контурі до досягнення заданої величини. Такий процес водообміну є досить тривалим.

Для оптимального планування перехідного процесу з водообміном потрібно заздалегідь знати приблизну тривалість цього водообміну.

Зміну у часі поточної концентрації борної кислоти в першому контурі можна визначити за допомогою виразу:

$$C(t) = C_{\pi} - (C_{\pi} - C_0) \cdot \exp(-G \cdot t/M),$$

де t - час від початку водообміну, год.;

$C(t)$ - концентрація в момент t , г/дм³;

C_0 - початкова концентрація борної кислоти в першому контурі, г/дм³;

C_{π} - концентрація борної кислоти, що подається в перший контур, г/дм³;

G - витрата підживлення, т/год.;

M - маса теплоносія в першому контурі, т.

Завдання:

1) Провести розрахунки $C(t)$ по зміні концентрації від поточної (по тренажеру) протягом 10 годин при введенні борного концентрату по лінії ТВ10S26 (з витратою по тренажеру). Отримати графік у вигляді:



2) Визначити тривалість водообміну для підвищення концентрації від поточної (по тренажеру) до заданого рівня (C_k). Значення C_k – відповідно до варіанту виконання завдання.

3) Виконати на тренажері водообмін з підвищенням концентрації до C_k подачею борного концентрату з баку ТВ10В01 по лінії ТВ10S26. Зафіксувати тривалість водообміну по тренажеру.

Вихідні данні:

Концентрація борного концентрату в баку ТВ10В01 40 г/дм³.

Масу теплоносія в першому контурі прийняти рівною 280 т.

Значення, до якого треба підвищити концентрацію борної кислоти в теплоносії першого контуру (Ск) взяти відповідно до свого варіанту (див. розділ 8).

Інші данні для аналізу взяти з екрану ТК тренажера (див. Рисунок 6.1).

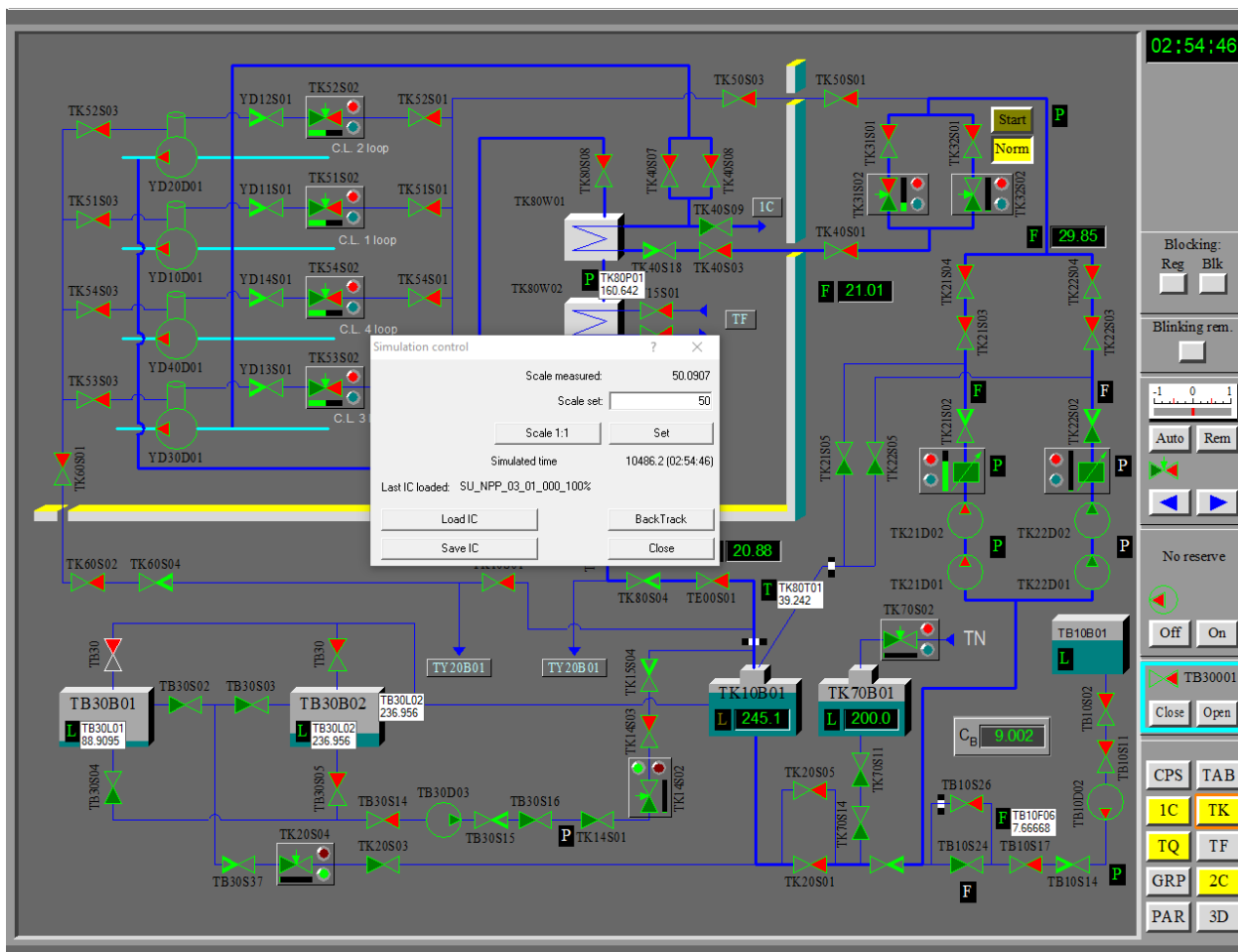


Рисунок 6.1 – Екран ТК тренажера

7. Короткий опис схем та обладнання, що задіяно у курсовій роботі

7.1. Перший контур

Перший контур – контур, разом із системою компенсації тиску, яким циркулює теплоносієм через активну зону, під робочим тиском.

Енергія ядерного поділу перетворюється на теплову енергію у паливі активної зони реактора і передається через оболонки твел теплоносієм першого контуру. Теплоносієм, отримавши в реакторі тепло, циркулює по петлях головного циркуляційного контуру та передає тепло котловій воді парогенераторів.

Вироблена в парогенераторах суха насичена пара надходить на турбогенератор для вироблення електроенергії (це вже другий контур).

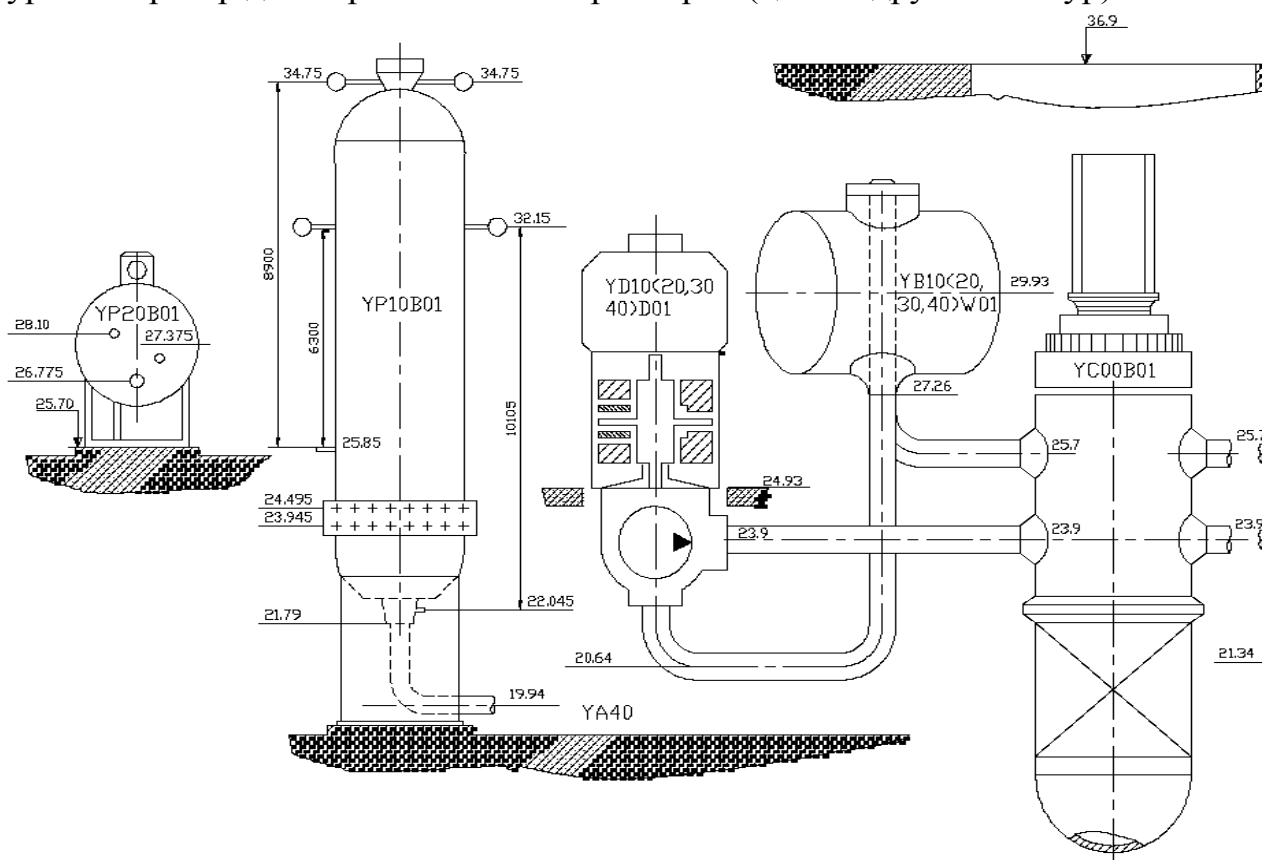


Рисунок 7.1 - Схема розташування основного обладнання першого контуру

Повний геометричний об'єм першого контуру – 374 м³.

Об'єм, який займає теплоносієм першого контуру – 360 м³.

Повний геометричний об'єм першого контуру розподіляється по обладнанню РУ наступним чином:

- об'єм реактора – 110 м³,
- повний об'єм КТ – 79 м³,
- об'єм КТ, заповнений водною фазою – 69 м³,
- об'єм парогенераторів - 21 x 4 = 84 м³,
- обсяг равликів ГЦН - 3 x 4 = 12 м³,
- обсяг трубопроводів ГЦК - 21 x 4 = 84 м³,
- обсяг трубопроводів КТ та CAOЗ – 5 м³.

7.2. Реактор

Серійний реактор ВВЕР-1000 (маркування YC00B01) входить до складу реакторної установки В-320 з як основний елемент головного циркуляційного контуру і призначений для вироблення в активній зоні теплової енергії, що передається теплоносія першого контуру. Водоводяний енергетичний реактор ВВЕР-1000 є реактором корпусного типу на теплових нейтронах з водою під тиском.

Після проведення модернізації обґрунтовано можливість підвищення номінальної теплової потужності ВВЕР-1000 на 1,5%.

Для реактора, що представлено у тренажері номінальна тепла потужність складає 3040 МВт.

Реактор являє собою вертикальну циліндричну посудину високого тиску, всередині якої розміщується активна зона та внутрішньокорпусні пристрої.

Теплоносієм та сповільнювачем в реакторі є хімічно знесолена вода з борною кислотою, концентрація якої змінюється в процесі експлуатації в межах 0-16 г/дм³ води.

Примусова циркуляція теплоносія здійснюється за чотирма замкнутими петлями 1 контуру за рахунок роботи головних циркуляційних насосів (ГЦН).

Вода 1 контуру, охолоджена в парогенераторах, надходить через нижній ряд 4 вхідних (напірних) патрубків корпусу Ду850, опускається в нижню частину корпусу реактора по кільцевому зазору між корпусом і шахтою реактора, і знизу через перфорований еліптичний днище шахти і отвори активної зони.

Нагрітий в активній зоні за рахунок тепла ядерної реакції теплоносії виходить через отвори в нижній решітці БЗТ у його міжтрубний простір, звідки відводиться через отвори в обичайках БЗТ та шахти по чотирьох верхніх патрубках Ду850.

Для управління ходом ланцюгової реакції поділу служать спеціальні органи регулювання (ОР СУЗ). У реакторах на теплових нейтронах органами регулювання є зазвичай стрижні з матеріалів, що сильно поглинають нейтрони – карбід бору. Коли такі стрижні введені в активну зону, розвиток ланцюгової реакції виявляється неможливим, незважаючи на те, що завантаження реактора матеріалом, що ділиться, перевищує критичну.

У міру виведення регулюючих стрижнів з активної зони поглинання нейтронів зменшується, і при певному положенні стрижнів нейтронів, що залишаються, вистачає для того, щоб ланцюгова реакція була самопідтримуємою. Такий стан реактора називається критичним. Якщо ще більше висунути стрижні, реактор стає надкритичним і ланцюгова реакція в ньому почне розвиватись, а потужність зростатиме. Коли реактор досягне потрібного рівня потужності, його можна повернути в критичний стан, при якому підтримуватиметься цей досягнутий рівень потужності. Якщо тепер трохи опустити регулюючі стрижні, реактор стане підкритичним і його потужність почне поступово знижуватися.

Великі кампанії активних зон енергетичних реакторів вимагають великих початкових запасів реактивності (великого надлишку маси ядерного палива над необхідною критичною масою), отже, і більших кількостей поглиначів у теплоносії першого контуру для компенсації надлишкової реактивності.

Аварійна зупинка реактора здійснюється шляхом скидання ОР СУЗ униз за час не більше 4 секунд.

- 1 – канал іонізаційної камери АKNП;
- 2 – машина для огляду корпусу;
- 3 – нижня секція теплоізоляції;
- 4 – корпус реактора;
- 5 – верхня секція теплоізоляції;
- 6 – металоконструкція радіаційно-теплого захисту;
- 7 – анкерні зв'язки опорної ферми;
- 8 – опорна ферма;
- 9 – опорне кільце корпусу;
- 10 – теплоізоляція зони патрубків Ду850;
- 11 – шпонка упорного кільця;
- 12 – упорне кільце;
- 13 – сифон;
- 14 – теплоізоляція верхнього блоку (ВБ);
- 15 – каркас блоку електророзведень;
- 16 – траверса ВБ;
- 17 – привід СУЗ;
- 18 – кришка реактора;
- 19 – шпилька головного роз'єму реактора;
- 20 – верхня плита блоку захисних труб (БЗТ);
- 21 – захисна труба БЗТ;
- 22 – БЗТ;
- 23 – нижня плита БЗТ;
- 24 – ТВС;
- 25 – вигородка активної зони;
- 26 – анкерний зв'язок обичайки боксу;
- 27 – обичайка боксу;
- 28 – днище шахти реактора внутрішньокорпусної;
- 29 – теплоізоляція днища шахти реактора бетонної.

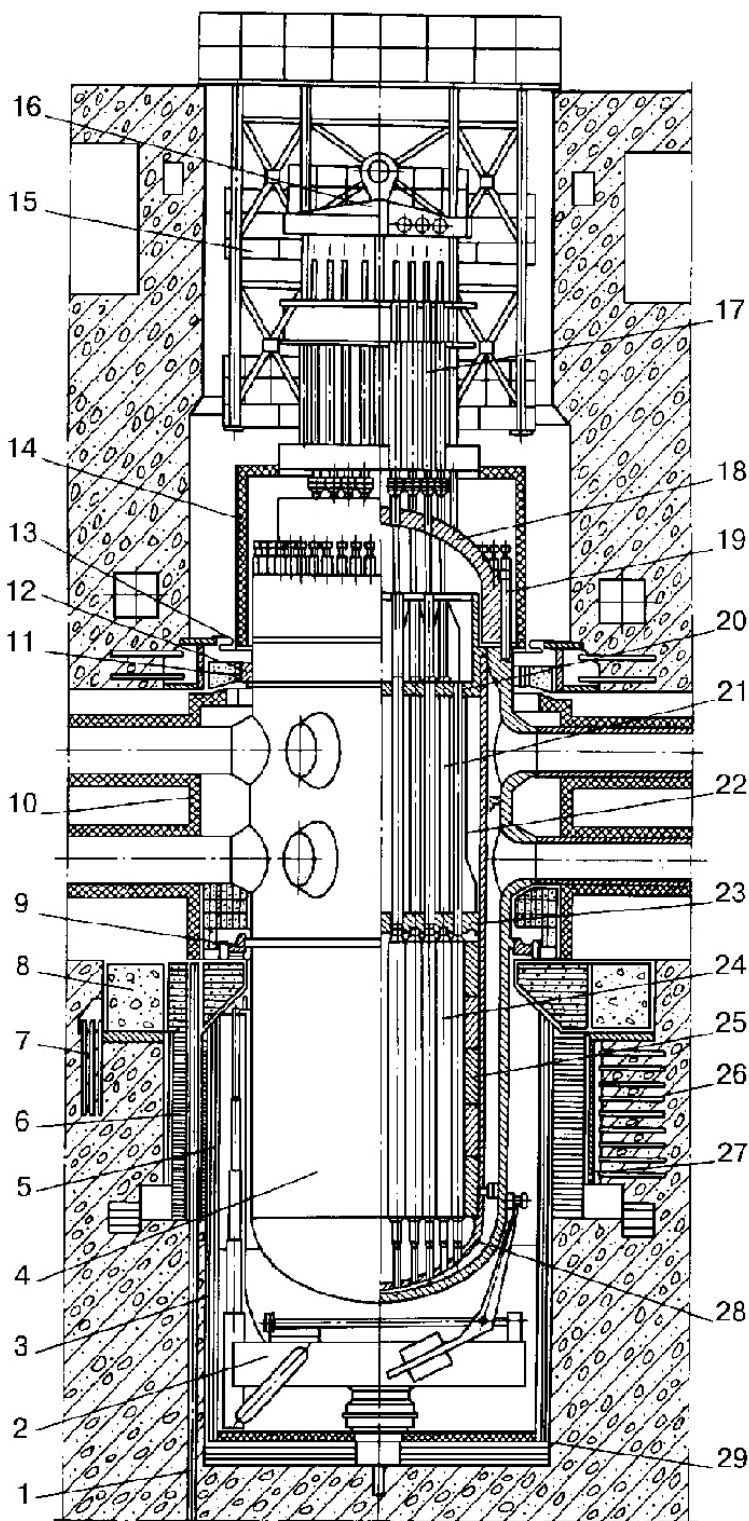


Рисунок 7.2 - Реактор ВВЕР-1000 у бетонній шахті («сухий» захист)

7.3. Апаратура контролю нейтронного потоку

Нейтронна потужність ядерного реактора, залежно від режиму його роботи, змінюється у дуже широкому діапазоні значень. Для надійного контролю роботи реакторної установки, у частині що стосується густини потоку нейтронів в активній зоні і швидкості його зміни, у складі АСУТП енергоблоку передбачена апаратура контролю нейтронного потоку.

Комплекс технічних засобів апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП) призначений для формування сигналу нейтронної потужності (P_N) і періоду (T) реактора ВВЕР-1000 за значенням густини нейтронного потоку і швидкості його зміни на всіх рівнях потужності реактора.

Комплекс формує сигнали перевищення заданих значень P_N і T , видає сигнали в СУЗ, здійснює обробку, реєстрацію та подання інформації оператору.

Комплекс АКНП для одного енергоблоку складається із трьох незалежних систем.

АКНП використовує у якості первинних датчиків іонізаційні камери, які також називають блоками детектування. Блоки детектування розташовані зовні реактору - в каналах, що знаходяться в зоні «сухого» захисту бетонної шахти реактора. Блоки детектування розташовані по колу навкруг активної зони у бетонній шахті реактора під кутами 120 градусів відносно один одного.

Тобто АКНП є системою зовнішнього реакторного контролю.

Блоки детектування встановлюються стаціонарно по два в одному вимірювальному каналі "сухого" захисту шахти реактора на рівні центру активної зони.

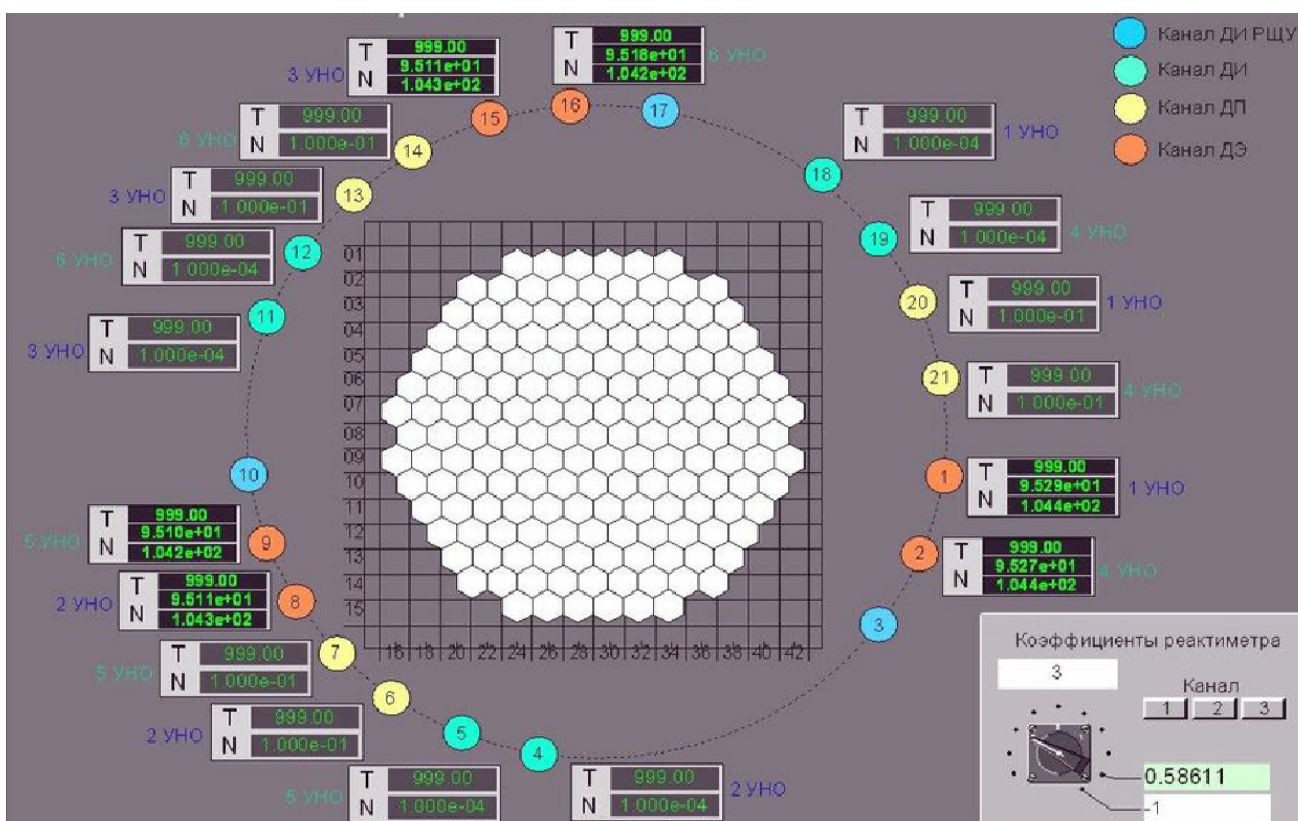


Рисунок 7.3 – Вимірювальні канали АКНП (знаходяться у бетонній шахті реактору)

7.4. Головний циркуляційний насос

Головний циркуляційний насос ГЦН-195М (YD10D01, YD20D01, YD30D01, YD40D01) призначений для створення циркуляції теплоносія у першому контурі РУ для відведення тепла з активної зони реактора.

ГЦН є вертикальним відцентровим одноступеневим насосом з блоком торцевого ущільнення валу, консольним робочим колесом, осьовим підведенням води і виносним асинхронним двигуном.

Виймна частина ГЦН складається з корпусу, валу з втулками радіального підшипника ковзання, блоку торцевого ущільнення валу, головного упорного підшипника з антиверсним пристроєм та електромагнітним розвантажувальним пристроєм, робочого та допоміжного колеса, екрану, теплового бар'єру та деталей кріплення.

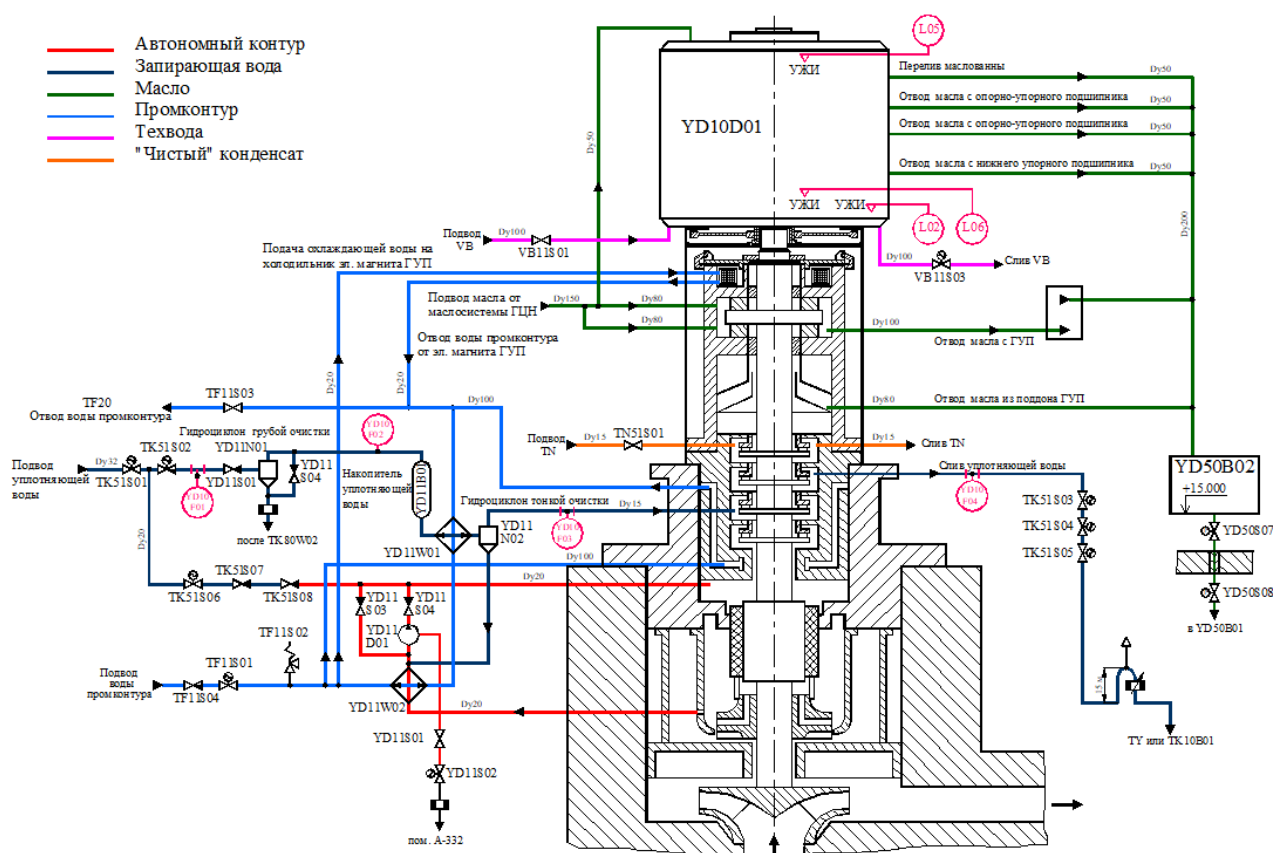


Рисунок 7.4 – ГЦН з забезпечуючими системами

Частота обертів 1000 об/хвилину.

Потужність на холодній воді 6800 кВт.

Потужність на гарячій воді 5100 кВт.

Напір $6,75 \pm 0,25$ кгс/см².

Подача номінальна 20000 м³/годину.

Допустимий діапазон подачі 20000÷27000 м³/годину.

Подача (витрата) від ГЦН може змінюватись продовж експлуатації АЕС та визначається витратно-напірною характеристикою після кожного капітального ремонту ГЦН.

У тренажері реалізована номінальна витрата від ГЦН на рівні 21800 м³/годину.

7.5. Парогенератор

Парогенератор ПГВ-1000М (YB10W01, YB20W01, YB30W01, YB40W01) призначений для вироблення сухої насиченої пари у складі енергоблоку з водо-водяним енергетичним реактором і є складовою головного циркуляційного контуру реакторної установки.

Тип парогенератора - горизонтальний, однокорпусний, із зануреною поверхнею теплообміну з горизонтально розташованих труб, із вбудованими паросепараційними пристроями, системою роздачі поживної води, паровим колектором, із зануреним дірчастим листом, системою роздачі аварійної поживної води.

Нагрітий в реакторі теплоносій першого контуру по гарячій нитці головного циркуляційного трубопроводу Ду850 подається в гарячий колектор парогенератора, звідки подається по U-подібним змійовикам. Проходячи всередині змійовиків теплоносій віддає тепло котловій воді другого контуру парогенератора і, охолоджуючись, виходить в холодний колектор парогенератора і далі подається в холодну нитку головного циркуляційного трубопроводу Ду850 на вхід ГЦН.

Живильна вода трубопроводом Ду400 подається в парогенератор, звідки через пристрій роздачі надходить на гарячу сторону теплообмінного пучка, чим досягається часткове вирівнювання парового навантаження по перерізу парогенератора за рахунок конденсації частини пари.

Циркуляція котлової води у парогенераторі – природна. Пара, виходячи з дзеркала випаровування, осушується в паровому обсязі за рахунок гравітаційних сил і надходить у жалюзійний сепаратор, де додатково осушується до необхідного ступеня.

Осушена пара виходить з парогенератора через 10 парових патрубків в колектор пари, звідки паропроводами подається на турбіну.

Теплова потужність $750 \pm 7\%$ МВт.

Паропродуктивність 1470 ± 103 т/годину.

Температура живильної води 220 ± 5 °С.

Поверхня теплообміну 6000 м^2 .

електронагрівачі. Розбризувальний пристрій виконано у вигляді роздаткового колектора, прикріпленого до верхнього днища.

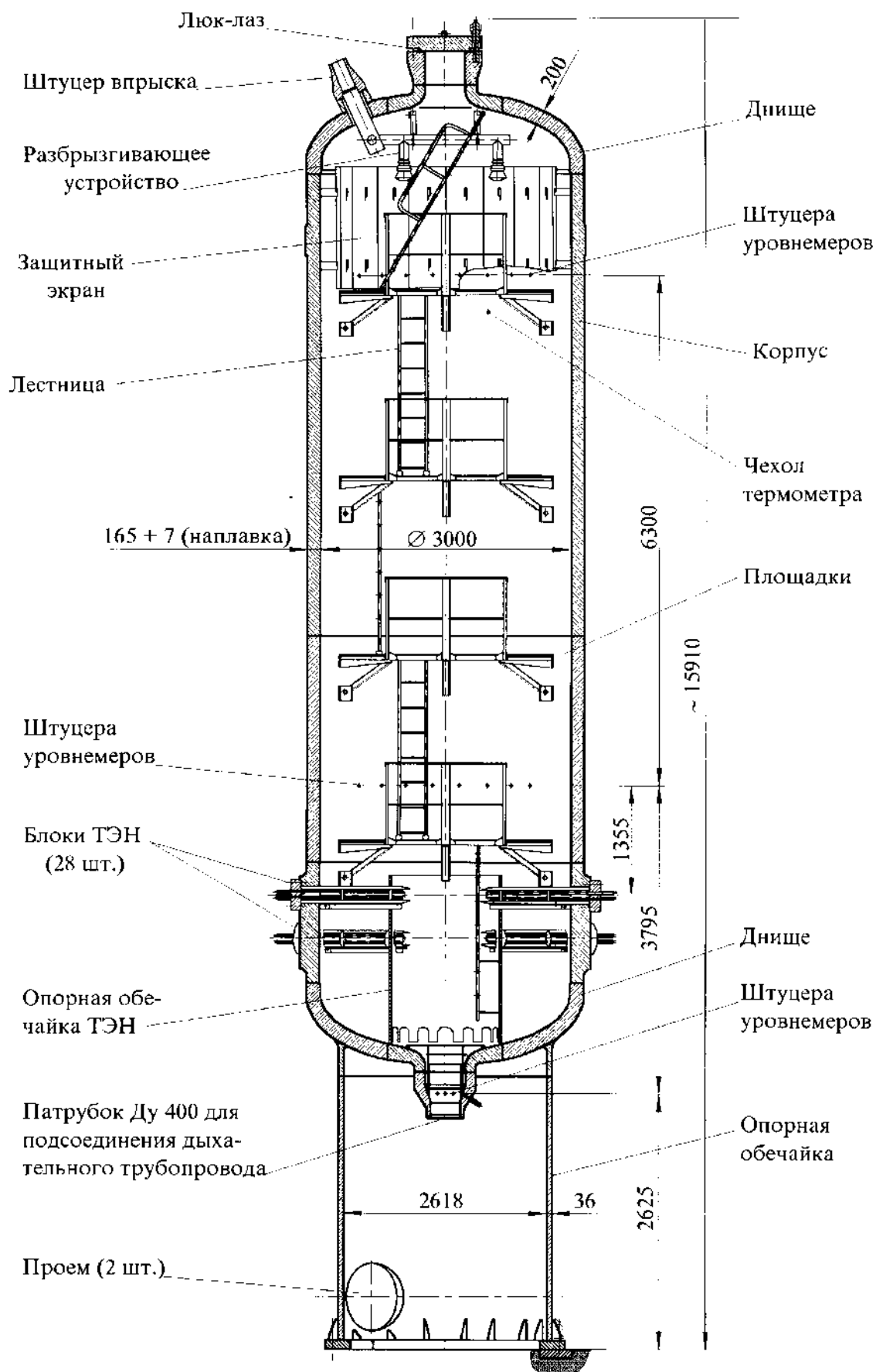


Рисунок 7.6 – Компенсатор тиску

7.7. Турбоустановка та другий контур

Другий контур – це контур теплоносія турбіни, призначений для циркуляції теплоносія (робочого тіла) через парогенератори та турбіну у встановлених проектом режимах та умовах. У цьому контурі робочим тілом проводиться відбір енергії (тепла) від першого контуру, її передача та перетворення. Саме робоче тіло в процесі відбору, передачі та перетворення енергії змінює свій агрегатний стан від газоподібної (насиченої водяної пари) до рідкої (конденсату, живильної води) зі зверненням по замкнутому контуру.

Турбінами (від латинського *turbo* - вихор, обертання) називають лопатеві машини, що перетворюють кінетичну та потенційну енергію потоку робочого тіла в механічну енергію обертання валу. Механічна енергія, що передається на вал ротора генератора від валу турбіни, перетворюється на електричну енергію електромагнітним шляхом. По суті паротурбінна установка є приводним механізмом електричного генератора.

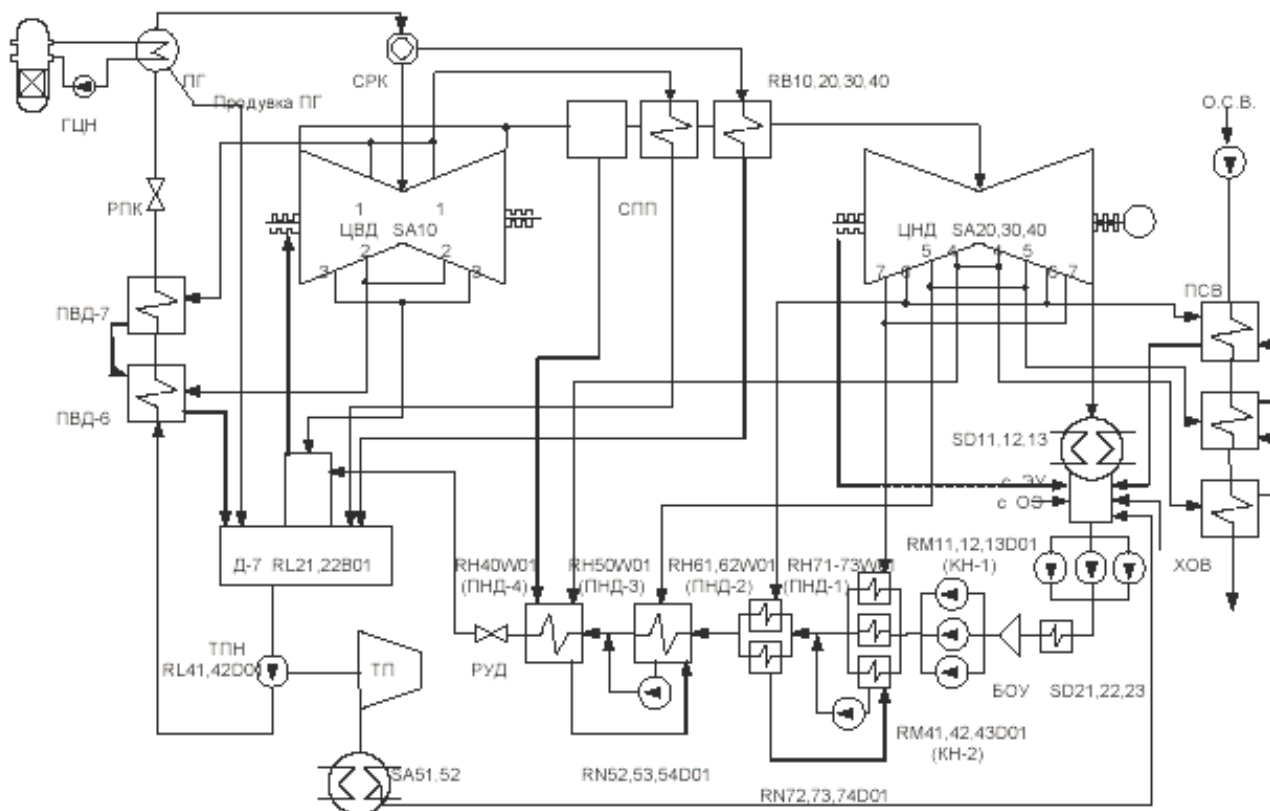


Рисунок 7.7 – Теплова схема другого контуру з турбіною К-1000-60/1500-ІІ (спрощена)

Свіжа пара з парогенераторів підводиться до чотирьох блоків стопорно-регулюючих клапанів (СРК), встановлених поруч із циліндром високого тиску (ЦВТ). Кожен із блоків СРК включає стопорний клапан діаметром 600 мм, усередині якого розташований регулюючий клапан діаметром 480 мм.

Відведення пари з ЦВТ при тиску $11,6 \text{ кгс/см}^2$ та вологості 12% здійснюється з чотирьох патрубків, розташованих у нижній половині корпусу.

По чотирьом трубах діаметром 1200 мм, пар направляється до чотирьох сепараторів-пароперегрівачів (СПП). Тут після сепарації вологи здійснюється двоступінчастий перегрів пари (у I ступені – паром першого відбору з тиском 30,4 кгс/см² і температурою 233,5°C, у II ступені - свіжою паром з ГПК).

Перегріта пара при параметрах 11,1 кгс/см² і 250°C з кожного СПП за чотирма трубопроводами діаметром 1200 мм через ресивери надходить до трьох циліндрів низького тиску (ЦНТ).

Відпрацьована пара з циліндрів низького тиску прямує до конденсаторів. З кожного ЦНТ пара надходить у свій конденсатор з охолоджувальною поверхнею 33160 м². Витрата охолоджувальної води 169800 м³/год. Проектний тиск у паровому об'ємі конденсатора турбіни складає 0,05 кгс/см².

Регенеративна система турбоустановки складається з чотирьох підігрівачів низького тиску (ПНТ) поверхневого типу, деаератора та двох ПВТ. Для підвищення економічності конденсат пари з ПНТ-1 і ПНТ-3 закачується дренажними насосами в конденсатний тракт. Тиск в деаераторі при номінальному навантаженні 6 кгс/см².

Живильна вода в відігрівач високого тиску (ПВТ) подається двома турбоживильними насосами (ТЖН) потужністю близько 11 МВт кожен. Привідна турбіна ТЖН живиться перегрітою паром, що відбирається за СПП, і має власний конденсатор.

7.8. Система підживлення-продування ТК

Система підживлення-продування першого контуру призначена для:

- заповнення та підживлення 1 контуру теплоносієм;
- заповнення гідросмекостей (ГЄ) САОЗ;
- підтримання матеріального балансу теплоносія 1 контуру;
- підтримання заданої концентрації борної кислоти в 1 контурі;
- планового регулювання потужності реактора (спільно з СУЗ);
- подачі замикаючої води на ущільнення ГЦН;
- аварійного охолодження автономного контуру ГЦН;
- забезпечення ВХР 1 контуру;
- дегазації теплоносія 1 контуру;
- дегазації та повернення організованих протікань в 1 контур;
- перевірки щільності (опресування) 1 контуру тиском 35, 100, 160, 180 кгс/см²;
- розхолодження компенсатора тиску при непрацюючих ГЦН.

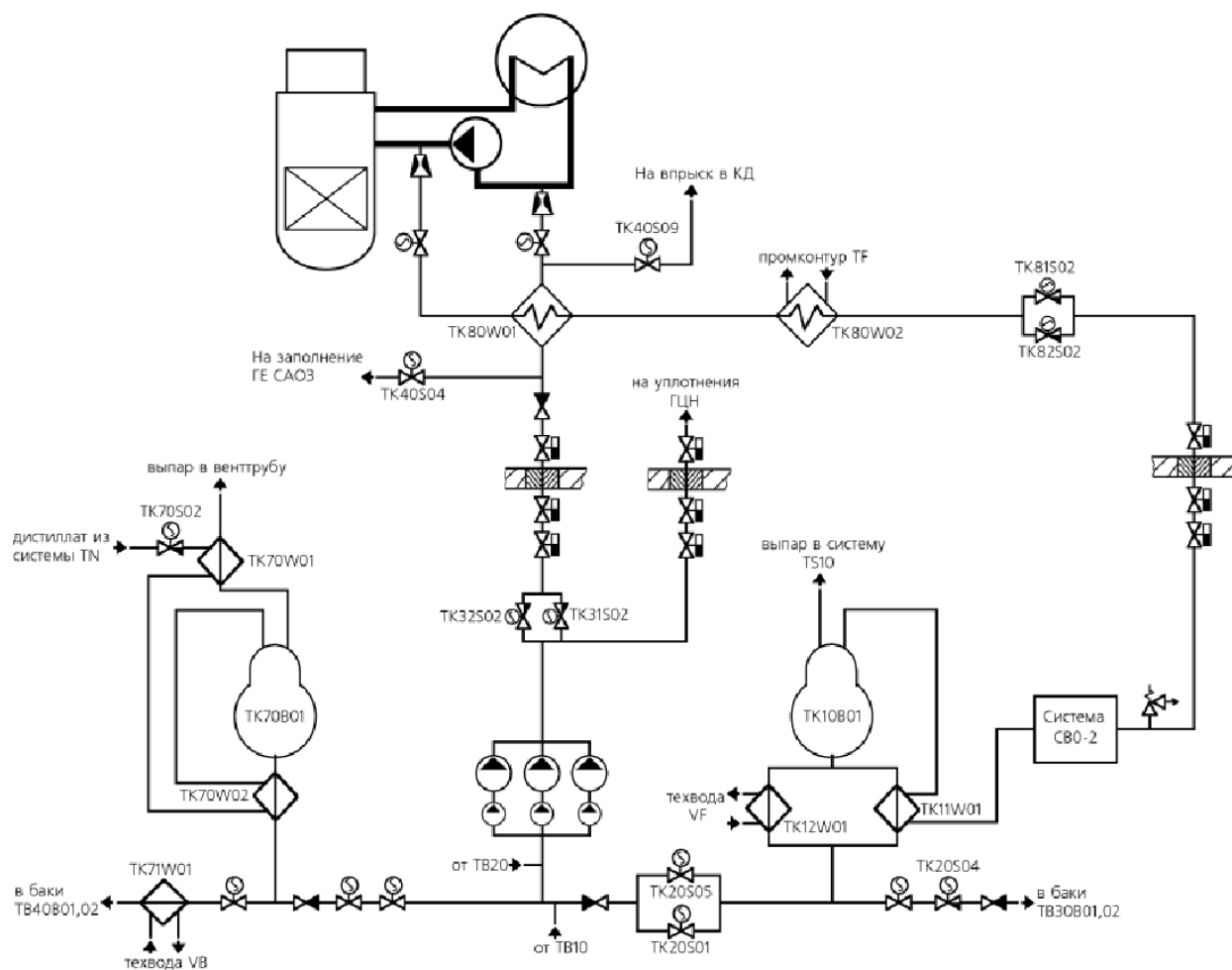


Рисунок 7.8 – Спрощена схема системи підживлення-продування ТК

Підсистема продування призначена для відбору теплоносія першого контуру з напору кожного ГЦН, подачі його на очищення в СВО-2 і в деаератор підживлення для очищення від газів, що не конденсуються, перед подачею на всмоктування підживлювальних насосів.

Підсистема включає регенеративний теплообмінник ТК80W01, доохолоджувач продувної води ТК80W02, регулятори тиску продувної води ТК81S02, ТК82S02.

Продувна вода надходить у послідовно з'єднані регенеративний теплообмінник продування ТК80W01, де охолоджується водою підживлювальної лінії, і доохолоджувач продування ТК80W02, де охолоджується водою промконтур TF. Після доохолоджувача продування вода має температуру 45-50°C.

7.9. Система промконтур TF

Для охолодження обладнання та зниження температури робочих середовищ систем реакторного відділення зазвичай використовується технічна вода групи А (VF) і В (VB).

Однак у разі охолодження споживачів з радіоактивним середовищем при високих параметрах з використанням систем технічної води при пошкодженні теплообмінних пристроїв можливе її забруднення внаслідок надходження радіоактивних речовин. І тут використання техводи небажано, оскільки може бути забруднення доквілля.

Тому в реакторному відділенні є проміжний контур (промконтур).

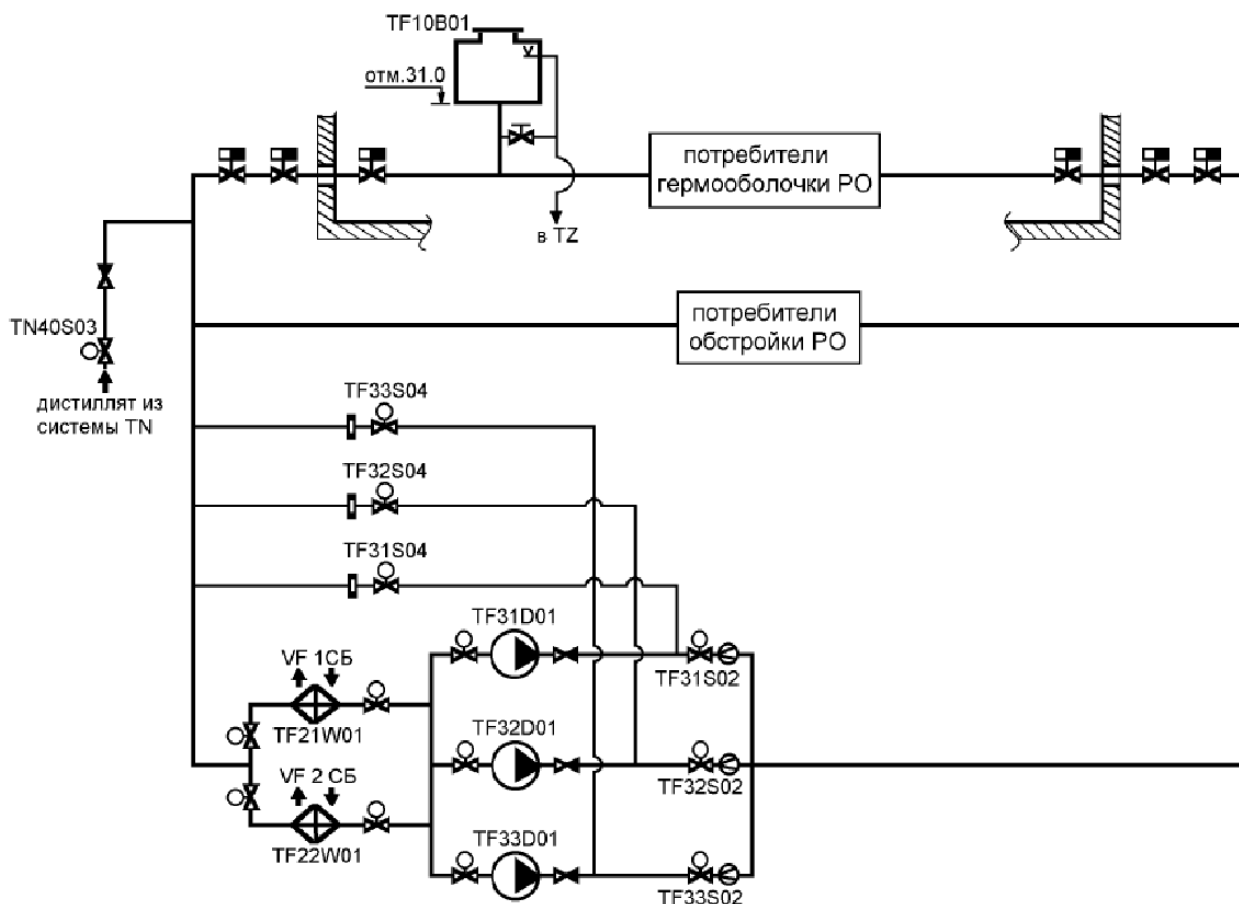


Рисунок 7.9 – Спрощена схема системи промконтуру TF

Система призначена для відведення тепла від споживачів, що працюють із радіоактивними теплоносіями високих параметрів:

- головних циркуляційних насосів YD10-40D01;
- охолоджувача організованих протікань TY10W01;
- доохолоджувача продування 1 контуру TK80W02;
- охолоджувача барботера YP20B01;
- охолоджувачів відбору проб із реактора TV30,40,50W01;
- охолоджувача відбору проб із КТ TV10W01;
- охолоджувача відбору проб газового об'єму ББ TV10W02;
- охолоджувачів відбору проб фільтрів СВО-1 TV10W03-10;
- охолоджувачів відбору проб із системи ТК TV20W01,02.

Вода промконтуру, охолоджуючи споживачі, циркулює по замкнутому контуру за допомогою насосів промконтуру TF31D01, TF32D01, TF33D01 та охолоджується в теплообмінниках промконтуру TF21W01, TF22W01 технічною водою.

Таким чином промконтур - замкнута система, що не виходить за межі будівлі реакторного відділення і служить проміжною ланкою між споживачами радіоактивного середовища і техводою групи А.

Промконтур запобігає попаданню радіоактивних ізотопів у технічну воду при порушенні герметичності обладнання, безпосередньо пов'язаного з 1 контуром.

Тепло, відведене теплоносієм промконтуру від споживачів реакторного відділення передається технічній воді групи А VF в теплообмінниках промконтуру TF21,22W01. З метою організації можливості ремонту та чищення теплообмінників TF їх у системі встановлено два, нормальної роботи одного достатньо для організації теплоснімання.

Для охолодження технічна вода групи А VF відводиться в бризкальні басейни.

8. Загальна процедура виконання курсової роботи

8.1. Курсова робота виконується здобувачем вищої освіти самостійно з використанням тренажера РУ з ВВЕР-1000 (WVER-1000 Reactor Simulator).

8.2. Протягом виконання роботи здобувачу вищої освіти потрібно ознайомитись з коротким описом схем та обладнання, що задіяно у курсовій роботі (див. розділ 7).

8.3. В курсовій роботі потрібно виконати наступні розрахунки:

1. Розрахунок теплової потужності реактора.
2. Розрахунок електричної потужності турбогенератора.
3. Розрахунок теплового балансу між першим та другим контурами.
4. Розрахунок зміни рівня в компенсаторі тиску.
5. Розрахунок параметрів теплообмінника системи підживлення-скидання.
6. Визначення тривалості подавання борного концентрату.

8.4. Розрахунки №1-5 виконуються для:

- 1) початкового стану (100% рівень потужності), який присутній у момент запуску тренажера;
- 2) для стану зниженої потужності відповідно до особистого варіанту завдання (див. Таблицю 8.1).

Розрахунок №6, пов'язаний з подачею борного концентрату у перший контур, виконується один раз після завершення розрахунків №1-5 на обох рівнях потужності.

8.5. Перед проведенням розрахунків для початкового стану (100% рівень потужності) потрібно:

- зробити скріни екранів тренажера, на яких відображені необхідні дані для розрахунку (як це показано вище у даних методичних вказівках);
- виписати всі необхідні вихідні данні з екранів тренажера та з описової частини (розділ 7).

8.6. Перед початком виконання перехідного процесу потрібно організувати виведення наступних графіків (на одному графіку):

- нейтронна потужність (N_POWER);
- тепла потужність (T_POWER);
- реактивність (REACTIVITY);
- положення 10 групи ОП СУЗ (YS05S32);
- положення 9 групи ОП СУЗ (YS02S29);
- положення 8 групи ОП СУЗ (YS03S32);
- середня температура першого контуру (T1KONTUR);
- тиск над активною зоною (YC00P01)
- тиск у головному паровому колекторі (RC11P01)
- положення СРК ТГ (RA11S03);

Для графіків використовувати підпрограму візуалізації тренажера (Current protocol).

8.7. Криві на графіках необхідно позначити таким чином, щоб було ясно приналежність кривих відповідним параметрам.

Таблиця 8.1 – Варіанти завдання для виконання курсової роботи

№ варіанту	Модель тренажера	Рівень потужності	Потрібна концентрація H_3BO_3 (Ск), г/дм ³
1.	Rated state operation. 1 load	80 %	15
2.	Rated state operation. 1 load	75 %	14,5
3.	Rated state operation. 1 load	70 %	14
4.	Rated state operation. 1 load	65 %	13,5
5.	Rated state operation. 1 load	60 %	13
6.	Rated state operation. 1 load	55 %	12,5
7.	Rated state operation. 1 load	50 %	12
8.	Rated state operation. 1 load	45 %	11,5
9.	Rated state operation. 1 load	40 %	11
10.	Rated state operation. 1 load	35 %	10,5
11.	Rated state operation. 1 load	30 %	10
12.	Rated state operation. 1 load	25 %	9,5
13.	Rated state operation. 1 load	20 %	9
14.	Rated state operation. 1 load	15 %	8,5
15.	Rated state operation. 1 load	10 %	8
16.	Rated state operation. 5 load	80 %	12,5
17.	Rated state operation. 5 load	75 %	12
18.	Rated state operation. 5 load	70 %	11,5
19.	Rated state operation. 5 load	65 %	11
20.	Rated state operation. 5 load	60 %	10,5

№ варіанту	Модель тренажера	Рівень потужності	Потрібна концентрація H_3BO_3 (Ск), г/дм ³
21.	Rated state operation. 5 load	55 %	10
22.	Rated state operation. 5 load	50 %	9,5
23.	Rated state operation. 5 load	45 %	9
24.	Rated state operation. 5 load	40 %	8,5
25.	Rated state operation. 5 load	35 %	8
26.	Rated state operation. 5 load	30 %	7,5
27.	Rated state operation. 5 load	25 %	7
28.	Rated state operation. 5 load	20 %	6,5
29.	Rated state operation. 5 load	15 %	6
30.	Rated state operation. 5 load	10 %	5,5

8.8. Перехідний процес зі зниженням потужності організувати натисканням кнопки ПЗ-1 (PP) на екрані CPS. Вийти на потрібну потужність, орієнтуючись на нейтронну потужність (N). Точність виходу повинна складати $\pm 2\%$. Після виходу на потрібну потужність відразу зупинити тренажер (кнопкою Start/Stop).

У разі виходу за допустимі $\pm 2\%$ перезапустити тренажер та повторити перехідний процес.

8.9. Після виходу на новий (знижений) рівень потужності потрібно:

- зробити скріни екранів тренажера на яких відображені необхідні дані для розрахунку (як це показано у даних методичних вказівках);
- зберегти графік перехідного процесу;
- зберегти стан тренажера.

Для збереження стану тренажера на спливаючій панелі керування у правильній частині екрана натисніть кнопку “Simulation control”. У вікні, натисніть клавішу Save IC і введіть ім'я файлу. Скористатись збереженим станом можна за допомогою клавіші “Load IC”.

8.10. Слід зазначити, що для розрахунку №4 потрібні данні як до так і після перехідного процесу. Тому він виконується лише один раз.

Розрахунки №1, 2, 3, 5 виконуються окремо для 100% рівня потужності, окремо для зниженого рівня потужності.

8.11. Для виконання розрахунку №6 потрібно виконати перехідний процес вказаний у розділі 6.

Перед виконанням цього перехідного процесу на окремому графіку вивести значення:

- концентрація борної кислоти в першому контурі (TV30Q01);
- нейтронна потужність (N_POWER);
- реактивність (REACTIVITY);
- середня температура першого контуру (T1KONTUR).

По закінченню перехідного процесу:

- зробити скріни екранів тренажера, на яких відображені необхідні дані для розрахунку;
- зберегти графік перехідного процесу;
- зберегти стан тренажера.

8.12. Протягом проведення перехідних процесів та розрахунків потрібно провести порівняння розрахункових результатів та результатів, отриманих на тренажері, таких як:

- теплова потужність реактора;
- величина зміни рівня в компенсаторі тиску;
- тривалість подавання борного концентрату.

Також слід проаналізувати та відмітити у роботі, як рівень потужності енергоблоку впливає на різні показники, які задіяні протягом виконання курсової роботи.

8.13. Основні етапи виконання курсової роботи визначаються календарним графіком (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 – Етапи виконання (календарний графік) курсової роботи

Вид роботи, що виконується	Тиждень семестру
Отримання завдання на курсову роботу. Підбір літературних джерел. Ознайомлення з тренажером на предмет виконання курсової роботи.	1
Частина 1.1 «Розрахунок теплової потужності реактора за параметрами першого контуру».	2
Частина 1.2 «Розрахунок теплової потужності реактора за параметрах в парогенераторах».	3
Частина 1.3 «Розрахунок теплової потужності реактора за параметрами АКНП».	4
Частина 1.4 «Розрахунок теплової потужності як середньозваженої характеристики по трьом методам оцінки».	5
Частина 2 «Розрахунок електричної потужності турбогенератора».	6
Оформлення результатів в рамках виконання контролю виконання курсової роботи.	7
Оформлення результатів в рамках виконання контролю виконання курсової роботи.	8
Частина 3 «Розрахунок теплового балансу між першим та другим контурами».	9
Частина 4 «Розрахунок зміни рівня в компенсаторі тиску».	10
Частина 5 «Розрахунок параметрів теплообмінника системи підживлення-скидання».	11
Частина 6 «Визначення тривалості подавання борного концентрату».	12
Оформлення пояснювальної записки.	13
Підготовка до захисту. Захист курсової роботи.	14
Захист курсової роботи.	15

8.14. У разі виникнення додаткових питань потрібно звернутись до джерел, наведених у розділі Література цих Методичних вказівок.

У разі, якщо питання не були зняті після опрацювання джерел наведених у розділі Література ці питання можуть бути зняті на консультаціях з даної курсової роботи.

9. Оформлення та здача курсової роботи

9.1 Оформлення курсової роботи

Робота повинна бути оформлена у вигляді пояснювальної записки.

Структура пояснювальної записки наступна:

- Титульний аркуш (показано у додатку А);
- Вступ з завданням на курсову роботу;
- Шість розділів з результатами шести розрахунків, а саме: скрінні екранів тренажера, графіки параметрів, таблиці з зведеними вихідними даними та отриманими результатами (власних розрахунків та значень отриманих на тренажері). В кінці кожного розділу приводиться порівняльний аналіз отриманих результатів;
- Висновки, у яких узагальнюються отримані результати порівняльного аналізу. Висновки мають бути зроблені індивідуально, тобто відображати, що робота виконана особисто та самостійно.
- Література, додатки (за необхідністю).

9.2 Захист курсової роботи

Захист відбувається у вигляді усного опитування.

Протягом захисту здобувачу може бути запропоновано використати тренажер для візуалізації окремих відповідей.

На захисті здобувач повинен продемонструвати, що він особисто та самостійно виконав усі завдання курсової роботи.

На захист виносять усі аспекти проведення курсової роботи, тобто здобувач має дати відповіді стосовно:

- самої процедури виконання курсової роботи;
- розрахункових залежностей (розуміти зв'язок параметрів, вміти написати та пояснити основні рівняння);
- вміння користування зовнішніми даними та програмами (в окремої, програмою для розрахунку властивостей води та пари);
- загальних знань теплогідрравлічних процесів в обладнанні АЕС;
- загальних знань нейтроннофізичних явищ в активній зоні РУ з ВВЕР-1000;
- тенденції зміни параметрів у розглянутих перехідних процесах енергоблоку АЕС;
- розмірностей параметрів;
- порівняльної оцінки результатів, отриманих на різних рівнях потужності;
- порівняльної оцінки результатів, отриманих розрахунковим шляхом та на тренажері.

Оригінальність курсової роботи (тобто підтвердження, що робота виконана особисто та самостійно) є необхідною вимогою.

Роботи, що містять плагіат до захисту не допускаються та не оцінюються.

9.3 Критерії оцінювання

Оцінювання процесу та результатів виконання курсової роботи проводиться у наведеній нижче послідовності та за такими критеріями.

Модуль 1:

Коректне виконання розрахунків та аналізу частин 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 2 оцінюються у 20 балів.

Модуль 2:

Коректне виконання розрахунків та аналізу частин 3, 4, 5, 6 оцінюються у 40 балів.

Повне та коректне оформлення пояснювальної записки оцінюється у 10 балів.

Вичерпні та коректні відповіді протягом захисту курсової роботи оцінюється у 30 балів.

Максимальна кількість балів, які може отримати здобувач вищої освіти за бездоганне виконання курсової роботи складає 100 балів.

Література

1. Верхівкер Г.П., Кравченко В.П. Основи розрахунків і конструювання ядерних енергетичних реакторів. – Одеса: ТЕС, 2009. – 409 с. (30 прим.)
2. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, РЗІ матеріали, конструкції, моделі / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна та ін. ; за ред. О.В. Єфімова. – Харків : ТОВ «В справі», 2017. – 420 с. <https://core.ac.uk/download/pdf/161787044.pdf>
3. Топольницький М.В. Атомні електричні станції / М.В. Топольницький. – Львів : Бескид Біт, 2005. – 523 с. (20 прим.)
4. Лекційні матеріали з навчальної дисципліни «Експлуатація АЕС». <https://drive.google.com/drive/folders/18v9BqxYq13ry13-81XdtCzWUfITwosbr>
5. Лабораторні матеріали з навчальної дисципліни «Експлуатація АЕС». <https://drive.google.com/drive/folders/1Rvf8XZq5zxWk157uXqY4HRGwMnLDHokO>
6. Навчальний посібник БалАЕС. Підготовка персоналу. <https://drive.google.com/drive/folders/1uheTbAtE7ipDCwaAOrL8pB39u5J0pylQ>

Додаток А Титульний аркуш курсової роботи

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»
Інститут енергетики
Кафедра атомних електричних станцій

Курсова робота з навчальної дисципліни «Експлуатація АЕС»

Здобувача другого (магістерського) рівня
вищої освіти із спеціальності
143 - «Атомна енергетика»
група _____

_____ ПІБ _____

Керівник:
Комаров Ю.О., д.т.н.,
доцент каф. АЕС.

Дата захисту: _____

Оцінка за національною шкалою: _____

Одеса
НУ «Одеська політехніка»
20__