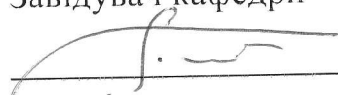


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**  
**Машинобудівний навчально-науковий інститут**

*Кафедра турбін*

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

  
"09" "12" 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття ступеня вищої освіти "магістр"**

на тему: *Оцінка ефективності газотурбінного двигуна простого циклу потужністю 60 МВт для застосування на електростанції*

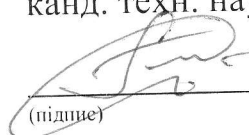
Виконав:

студент групи 6231м

  
(підпис) Костріков В.А.

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент

  
(підпис) Козловський А.В.

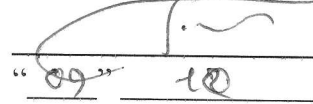
Миколаїв – 2025 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**  
**Машинобудівний навчально-науковий інститут**

Кафедра \_\_\_\_\_ турбін \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 142 "Енергетичне машинобудування" \_\_\_\_\_  
Освітня програма \_\_\_\_\_ "Газотурбінні установки і компресорні станції" \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

  
\_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**  
**на здобуття ступеня вищої освіти "магістр"**

Студенту \_\_\_\_\_ Кострікову В.А. \_\_\_\_\_

1. Тема роботи:

**" Оцінка ефективності газотурбінного двигуна простого циклу потужністю 60  
МВт для застосування на електростанції "**

Керівник роботи: \_\_\_\_\_ канд. техн. наук, доцент Козловський А.В. \_\_\_\_\_

Затверджені наказом ректора № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

2. Термін подання роботи: \_\_\_\_\_ 20.11.2025 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Потужність установки  $N_e=60$  МВт,  $T_3=1500$  К

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

4.1. Обґрунтування вибору теплової схеми ГТА.

4.2. Розрахунки турбіни низького тиску.

4.3. Термодинамічні та газодинамічні розрахунки.

4.4. Конструювання та конструктивні розрахунки.

4.5. Заходи з техніки безпеки, та охороні праці.

## 5. Консультанти розділів роботи

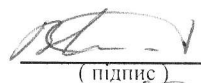
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |

6. Дата видачі завдання 05.09.2025

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

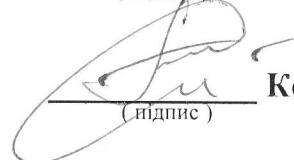
| № з/п | Назва етапів дипломного проекту                                                        | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Вибір теплової схеми та обґрунтування термодинамічних параметрів агрегату              | 5.09.2025                      |          |
| 2     | Розрахунок теплової схеми агрегату на номінальному режимі роботи                       | 16.09.2025                     |          |
| 3     | Визначення габаритних розмірів основних елементів агрегату                             | 21.09.2025                     |          |
| 4     | Газодинамічний розрахунок турбомашин                                                   | 28.09.2025                     |          |
| 5     | Міцнісні розрахунки                                                                    | 05.10.2025                     |          |
| 6     | Визначення осьових зусиль на роторі турбіни, розрахунок опорних та упорних підшипників | 12.10.2025                     |          |
| 7     | Розрахунки турбіни                                                                     | 19.10.2025                     |          |
| 8     | Розробка заходів по техніці безпеки, та охороні праці                                  | 03.11.2025                     |          |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки, та подання її до захисту                             | 10.11.2025                     |          |

Студент

  
 (підпис)

Костріков В. А.

Керівник роботи

  
 (підпис)

Козловський А. В.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**  
**Навчально-науковий машинобудівний інститут**

*Кафедра турбін*

**ПОЯСНЮВАЛЬНА  
ЗАПИСКА**

**до кваліфікаційної роботи  
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

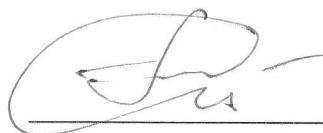
на тему: *Оцінка ефективності газотурбінного двигуна простого циклу потужністю 60 МВт для застосування на електростанції*

В проекті розроблені наступні питання: вибір теплової схеми і її детальний тепловий розрахунок; визначення габаритів елементів агрегату і термогазодинамічні розрахунки турбін; розробка конструкції турбіни ГТД; розрахунок робочої лопатки та диска 1-го ступеня на міцність; розробка системи охолодження. Розробка технологічного процесу. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів у машинному залі та розробка системи штучного освітлення. Визначення економічного ефекту проекрованої установки.

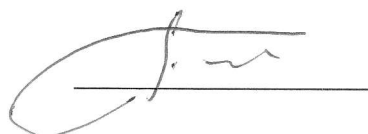
Студент групи 6231м

 Костріков В.А.

Керівник роботи

 Козловський А.В.

Завідувач кафедри

 Патлайчук В.М.

Миколаїв 2025 р.

## Зміст

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Пояснювальна записка .....                                                                       | 2  |
| Анотація .....                                                                                   | 8  |
| Вступ.....                                                                                       | 10 |
| 1 Обґрунтування теплової схеми, термо- і газодинамічні розрахунки .....                          | 12 |
| 1.1 Патентно-інформаційний пошук .....                                                           | 13 |
| 1.1.1 Розвиток ГТА.....                                                                          | 13 |
| 1.1.2 ГТД 110 в енергетиці.....                                                                  | 17 |
| 1.2 Вибір теплової схеми та обґрунтування термодинамічних параметрів ГТА ...                     | 20 |
| 1.3 Оптимізація параметрів циклу ГТА .....                                                       | 23 |
| 1.4 Детальний тепловий розрахунок ГТА простої схеми на режимі повної потужності .....            | 26 |
| 1.5 Габаритно-компоновочний розрахунок ГТД та побудова ескізу його меридіонального перетину..... | 29 |
| 1.5.1 Оцінка габаритного розміру осьового компресора .....                                       | 29 |
| 1.5.1.1 Розрахунок габаритів вхідного перетину осьового компресора....                           | 29 |
| 1.5.1.2 Розрахунок габаритів вихідного перетину осьового компресора..                            | 30 |
| 1.5.1.3 Оцінка числа ступенів і осьового габариту компресора.....                                | 31 |
| 1.5.2 Оцінка габаритів камери згоряння ГТД.....                                                  | 33 |
| 1.5.3 Визначення габаритних розмірів турбіни ГТД.....                                            | 34 |
| 1.5.3.1 Оцінка параметрів першого ступеня і габаритів вхідного перетину осьової турбіни.....     | 34 |
| 1.5.3.2. Розрахунок габаритів вихідного перетину осьової турбіни .....                           | 36 |
| 1.5.3.3 Визначення осьових габаритів турбіни .....                                               | 37 |
| 1.6 Термодинамічні розрахунки турбіни .....                                                      | 40 |
| 2 Конструювання та конструктивні розрахунки .....                                                | 47 |
| 2.1 Конструкція ГТД .....                                                                        | 48 |
| 2.2 Розрахунок закрутки лопатки 4-го ступеня.....                                                | 53 |
| 2.3 Розрахунок на міцність робочої лопатки 4-го ступеня турбіни .....                            | 57 |
| 2.4 Визначення запасу міцності диска 4-го ступеня турбіни .....                                  | 59 |

|              |               |              |              |               |                      |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|----------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | КР.142.6231м.03.3.ПЗ |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                      |  |  |  |  | 5    |
|              |               |              |              |               |                      |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |                      |  |  |  |  |      |



## АНОТАЦІЯ

У роботі виконані розробка та дослідження параметрів газотурбінного двигуна простого циклу потужністю 60 МВт для приводу генератора електричного струму. Представлено обґрунтування щодо вибору теплової схеми та термодинамічних параметрів спроектованої установки. Проведені оптимізаційний, тепловий та термодинамічні розрахунки ГТА. Результати цих розрахунків є вихідними даними для габаритних розрахунків елементів ГТД. Зроблено конструктивний опис агрегату, а також його системи охолодження. Проведено розрахунок закрутки робочої лопатки останньої ступені турбіни, розрахунок робочої лопатки на міцність та визначено запас міцності диску цього ж ступеня турбіни. Проведено аналіз небезпечних виробничих факторів в машинному відділенні, що шкідливо впливають на організм людини, та заходи щодо їх зменшення. Проведено аналіз шкідливого впливу відпрацьованих газів ГТД на оточуюче середовище. Розглянуто методи зменшення викидів шкідливих речовин газів, а також заходи, що поліпшують екологічні характеристики спроектованої установки. Представлено аналіз видів, наслідків і критичності відмов при функціонуванні електростанції.

**Ключові слова:** газотурбінна установка, енергетичне машинобудування, електростанція, генератор електричного струму, ефективність, витрата палива, тепловий розрахунок, габаритний розрахунок.

## ABSTRACT

The work includes the development and research of the parameters of a simple cycle gas turbine engine with a capacity of 60 MW for driving an electric generator. The justification for the choice of the thermal scheme and thermodynamic parameters of the designed installation is presented. Optimization, thermal and thermodynamic calculations of the gas turbine engine are carried out. The results of these calculations are the initial data for the dimensional calculations of the gas turbine elements. A constructive description of the unit, as well as its cooling system, is made. The calculation of the twist of the working blade of the last stage of the turbine is carried out, the calculation of the working blade for

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.А.ПЗ. | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 8    |
|               |      |          |        |      |                       |      |

strength is carried out, and the safety margin of the disk of the same stage of the turbine is determined. An analysis of hazardous production factors in the engine room that have a harmful effect on the human body is carried out, and measures to reduce them are taken. An analysis of the harmful impact of gas turbine exhaust gases on the environment is carried out. Methods for reducing emissions of harmful gases are considered, as well as measures that improve the environmental characteristics of the designed installation. An analysis of the types, consequences and criticality of failures during the operation of a power plant is presented.

**Keywords:** gas turbine plant, power engineering, power plant, electric current generator, efficiency, fuel consumption, thermal calculation, overall calculation.

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дубл.  |  |
| Взам. інв. №  |  |
| Підпис і дата |  |
| Інв. № подл.  |  |

|     |      |          |        |      |                       |      |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.А.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                       | 9    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |



## Вступ

Потреби в електричній енергії у світі постійно ростуть, і від того яким способом ця енергія буде добуватися багато в чому залежить майбутнє людства. Газотурбінні установки знаходять усе більше застосування в енергетиці. Поряд з використанням ГТУ для транспортування природного газу, їх все частіше встановлюють на електростанції для покриття пікових і напівпікових навантажень, або використовують як резервні двигуни. Це пояснюється рядом переваг ГТУ в порівнянні з іншими установками, у числі яких:

- мала питома маса;
- компактність;
- висока агрегатна потужність одного двигуна;
- високий ступінь автоматизації;
- можливість швидкої агрегатної заміни, що сприяє зменшенню трудомісткості при ремонті.

Для підвищення економічності двигуна необхідно добитися якомога більшого коефіцієнта корисної дії. Щоб досягти цього доводиться стикатися з певними труднощами: для підвищення ККД необхідно підвищити температуру газів перед турбіною  $T_3$ , але її підвищення обмежують гранично допустимі температури існуючих матеріалів; тому доводиться передбачати охолодження самих нагрітих деталей (лопатки, диски, корпусні деталі). Але охолодження ефективно лише до певної межі, оскільки втрати, пов'язані з відбором охолоджуючого повітря можуть бути більшими, ніж виграш від підвищення  $T_3$ . Крім того, при проектуванні, монтажі, експлуатації і ремонту енергетичних установок разом з їх економічною ефективністю екологічні показники грають важливу роль. Отже, при проектуванні ГТД доводиться вирішувати складний комплекс питань, пов'язаних як з економічністю, так і з екологічними показниками.

У зв'язку з цим з'являється необхідність застосування на електростанції ГТА складних теплових схем з утилізацією тепла випускних газів.

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Підпис і дата          |        |
| Інв. № дубл.           |        |
| Взам. інв. №           |        |
| Підпис і дата          |        |
| Інв. № подл.           |        |
| Зм.                    | Арк.   |
| № докум.               | Підпис |
| Дата                   |        |
| КР.142.6231м.03.Вс.ПЗ. |        |
| Арк.                   |        |
| 10                     |        |

**Метою наукового дослідження** є дослідження параметрів газотурбінний агрегат потужністю 60 МВт.

**Об'єкт дослідження** – газотурбінний агрегат потужністю 60 МВт.

**Предмет дослідження** – технічні та конструкційні параметри газотурбінного агрегату потужністю 60 МВт та його окремих елементів.

**Методи дослідження** - розробка конструкції та визначення ефективності газотурбінного агрегату та його окремих частин.

|              |      |          |        |      |                        |               |              |              |               |
|--------------|------|----------|--------|------|------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. |      |          |        |      |                        | Підпис і дата |              |              |               |
|              |      |          |        |      |                        |               | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |      |          |        |      |                        |               |              |              |               |
|              |      |          |        |      |                        |               |              |              |               |
| Зм.          | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.Вс.ПЗ. | Арк.          |              |              |               |
|              |      |          |        |      |                        | 11            |              |              |               |
|              |      |          |        |      |                        |               |              |              |               |

|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
|--------------|---------------|------------------|--------------|--------|--------------|-----------------------------------------------|---------------|------|------|---------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  | Взам. інв. № |        | Інв. № дубл. |                                               | Підпис і дата |      |      |         |
|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
| Зм.          |               | Арк.             | № докум.     | Підпис | Дата         | КР.142.6231м.03.01.ПЗ.                        |               |      |      |         |
| Студент.     |               | Костріков В.А.   |              |        |              | Термодинамічні та газодинамічні<br>розрахунки |               | Літ. | Арк. | Аркушів |
| Керівник     |               | Козловський А.В. |              |        |              |                                               |               |      | 12   | 46      |
| Консульт.    |               |                  |              |        |              |                                               |               | НУК  |      |         |
| Зав.кафедр   |               | Патлайчук В.М.   |              |        |              |                                               |               |      |      |         |
|              |               |                  |              |        |              |                                               |               |      |      |         |

### 1.1.1 Розвиток ГТА

Головним конструктором заводу і начальником знову організованого спеціального конструкторського бюро по газотурбінних установках (СКБ ГУ) був затверджений Сергій Дмитрович Колосов, що керував створенням газотурбінної установки М1 на авіаційному заводі №16 у м. Казані. Він був ініціатором використання авіаційного турбогвинтового двигуна на кораблях Військово-морського флоту.

У середині серпня 36 фахівців авіаційної промисловості, одержимі ідеєю застосування газових турбін на кораблях, прибули з Казані в Миколаїв для роботи в новому конструкторському бюро.

## Морські прискорювальні установки

Експлуатація перших газотурбінних установок на флоті показала необхідність розробки спеціальних корабельних двигунів, стійко і економічно працюючих від холостого ходу до максимального навантаження, пристосованих до тривалої роботи на дизельному паливі в морській атмосфері. Одночасно з виробництвом М1 проектується все-режимний двигун Д 053 для установки М 2 потужністю 15000 к.с. і витратою палива 260 г/к.с.год.

Двигун мав двокаскадний турбокомпресор, трубчасто-кільцеву камеру згоряння, вільну силову турбіну, удосконалену паливну апаратуру, поліпшену теплоізоляцію. Застосування нових матеріалів збільшило ресурс двигуна до 1000 годин.

У 1957 році прискорювальна газотурбінна установка М 2 була поставлена на протичовневий корабель проекту 159.

Для нових протичовневих кораблів з поліпшеними акустичними характеристиками були розроблені газотурбокомпресори ГТК Д2 (1960 р.) і ГТК ДЗ (1964 р.)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|
| Морські прискорювальні установки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Підпис і дата |          |
| Експлуатація перших газотурбінних установок на флоті показала необхідність розробки спеціальних корабельних двигунів, стійко і економічно працюючих від холостого ходу до максимального навантаження, пристосованих до тривалої роботи на дизельному паливі в морській атмосфері. Одночасно з виробництвом М1 проектується все-режимний двигун Д 053 для установки М 2 потужністю 15000 к.с. і витратою палива 260 г/к.с.год. | Інв. № дубл.  |          |
| Двигун мав двокаскадний турбокомпресор, трубчасто-кільцеву камеру згоряння, вільну силову турбіну, удосконалену паливну апаратуру, поліпшену теплоізоляцію. Застосування нових матеріалів збільшило ресурс двигуна до 1000 годин.                                                                                                                                                                                             | Взам. інв. №  |          |
| У 1957 році прискорювальна газотурбінна установка М 2 була поставлена на протичовневий корабель проекту 159.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Підпис і дата |          |
| Для нових протичовневих кораблів з поліпшеними акустичними характеристиками були розроблені газотурбокомпресори ГТК Д2 (1960 р.) і ГТК Д3 (1964 р.)                                                                                                                                                                                                                                                                           | Інв. № подл.  |          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               |          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               |          |
| Зм.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Арк.          | № докум. |
| Підпис                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Дата          |          |
| КР.142.6231м.03.01.ПЗ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               | Арк.     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               | 13       |

потужністю 18000 к.с., що подають повітря від окремо розміщених компресорів у гідромоторний пристрій.

Двигуни другого покоління

У 1965-1966 р. почалася розробка двигунів і установок II покоління з підвищеною економічністю (200-240 г/л.с.г), маневреністю, поліпшеними акустичними характеристиками, ресурсом не менш 10000 годин.

Були створені високо економічні корабельні установки М5, М7, до складу яких входили незалежні маршові і форсажні двигуни різної потужності. Редукторні передачі забезпечували кількісне регулювання потужності установки: роботу одного двигуна на два гребних гвинти і спільну роботу маршових і форсажних двигунів, що дало високу економічність установки на будь-яких ходових режимах.

В установках М5 і М7, що не мають аналогів у світовій практиці, уперше були впроваджені реверсивні силові турбіни, швидкодіючі шинно-пневматичні муфти, двухшвидкісні редуктори і ряд інших технічних рішень.

Двигуни третього і четвертого покоління

Наприкінці 60-х років з ініціативи і за участю НВП "Машпроект" першим ЦНДІ МО разом з Військово-морською академією та ЦНДІ імені академіка О.М. Крилова був виконаний комплекс науково - дослідних робіт з визначення шляхів подальшого вдосконалювання морських ЛІТІ У. Бужа показана можливість створення ряду уніфікованих двигунів для водотонажних кораблів і кораблів з динамічними принципами підтримки - ГТД третього покоління.

Ставилися задачі: зменшення питомої витрати палива ГТД на 20-25%, зниження маси ГТД у два-три рази та істотне зменшення осьового габариту ГТД.

У 1971 р. була прийнята урядова постанова, якою передбачалося розробити три уніфіковані двигуни: М75 потужністю 3700...4400 кВт, М70 потужністю 7350...8800 кВт та М80 потужністю 18400...22000 кВт.

Для забезпечення вимог технічного завдання на розробку двигунів третього покоління необхідно було здійснити наступні заходи: збільшити температуру газу перед турбінами на 200...250 град у порівнянні з двигунами другого покоління та довести її до рівня 1300 К і вище; збільшити величину загальної міри підвищення

|               |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
|---------------|--|--|--|--|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Підпис і дата |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № дубл.  |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
| Взам. інв. №  |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
| Підпис і дата |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № подл.  |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |
| Зм.           |  |  |  |  | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|               |  |  |  |  |      |          |        |      |                        | 14   |
|               |  |  |  |  |      |          |        |      |                        |      |

тиску повітря в компресорі ГТД до 17...20; істотно переглянути конструктивну схему двигуна.

Виконання цих задач вимагало розв'язання цілого ряду складних інженерно-технічних проблем: створення жароміцних корозійностійких у морських умовах сплавів і лопаткових покриттів, високоефективних систем охолодження деталей двигунів (у першу чергу - робочих лопаток). НВП "Машпроект" і ЦНДІКМ "Прометей" разом з інститутами АН України на початку 70-х років був створений корозійностійкий жароміцний сплав ЭП-539ЛМ, який став основою для одержання сплавів з підвищеними характеристиками міцності. У результаті цих робіт були отримані ливарні сплави ЧС-70 і ЧС-88, які широко застосовуються і в даний час. Були створені унікальні установки і відпрацьована технологія нанесення захисних покриттів турбінних лопаток, зокрема електронно-променеве напилювання чотирикомпонентного корозійностійкого (Co-Cr-Al-Y) і теплозахисного керамічного покриттів, а також упроваджені електронно-променеве зварювання і паяння застосовуваних у ГТД сплавів. Одночасно виконувався великий комплекс робіт з удосконалювання систем охолодження лопаток. Була відпрацьована і впроваджена вихрова система охолодження робочих лопаток, що забезпечує перепад температур між газом і металом більш ніж на 300 град.

У 1972 р. у дослідну експлуатацію був переданий перший десантний катер на повітряній подушці проекту 1206 "Кальмар" з головною ЕУ М70. Енергетична установка катера складалася з двох агрегатів типу МТ70К. До складу кожного агрегату входили ГТД типу ДК71 потужністю 7350 кВт і редукторна передача, яка передає цю потужність на вентилятор надування повітряної подушки та тягового повітряного гвинта змінюваного кроку (ГЗК). Усього на феодосійському виробничому об'єднанні "Море" було побудовано 22 катери цього проекту.

Про терміновість виконання замовлення на постачання цих ГТД говорить той факт, що на головний корабель був поставлений експериментальний двигун, який мав заводський № 02. У той же час повне відпрацьовування і доведення двигуна ГТА М70 продовжувалися ще на 30 двигунах.

|               |              |              |               |              |                        |  |  |  |  |      |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |                        |  |  |  |  | Арк. |
|               |              |              |               |              |                        |  |  |  |  | 15   |
| Зм.           | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата         | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |  |  |  |  |      |

Основні конструктивні відмінності двигуна М70 від ГТД другого покоління полягали в наступному: ротор турбокомпресорного блока високого тиску був виконаний двоопорним, що стало можливим завдяки прийнятій конструкції петльової протитокової камери згоряння, розташованої над КВТ; ТВТ була виконана одноступінчастою з консольним розміщенням її диска на задній цапфі ротора КВТ. Навантаження на ступінь ТВТ зросли, внаслідок цього колова швидкість робочих лопаток склала близько 450 м/с. Був виключений з конструкції опорний вінець ТВТ, а ТНТ сконструйована в одноступінчастому варіанті. Також удалося відмовитися від дуже ненадійного міжвального підшипника, який встановлювався на внутрішньому валу - між КНТ і ТНТ.

Економічність двигуна була збільшена в результаті зростання температури газу перед турбіною до 1373 К та міри підвищення тиску повітря в компресорі до 16,6, поліпшення аеродинаміки та ККД компресорів і турбін.

У 1984 р. був розроблений, а в 1988 р. почалося серійне виробництво суднового ГТД третього покоління М90, у якому були впроваджені всі прогресивні конструкторські рішення, що враховують накопичений досвід експлуатації двигунів М70, зокрема двоопорний ротор турбокомпресора високого тиску, пружно-масляні демпфери підшипникових опор, ефективна система охолодження деталей гарячої частини ГТД, нові матеріали і покриття. ГТД 15000, який випускається в даний час, є сучасною модифікацією двигуна М90.

На початку 90-х років була розроблена програма створення більш сучасних ГТД четвертого покоління. Однак з розпадом Радянського Союзу фінансування цієї програми Міністерством оборони було припинено. З великими труднощами НВП "Машпроект" таки вдалося створити новий двигун М80 потужністю 27500 кВт із ККД 36 %. Двигун має найбільшу з існуючих до цього часу морських ГТД міру підвищення тиску повітря в компресорі  $\pi_k = 23,6$ . Ці параметри забезпечуються двома дев'ятиступінчастими компресорами - КНТ і КВТ, з витратою повітря через КНТ - 91 кг/с. Перший ступінь КНТ виконаний надзвуковим. Температура газів перед ТВТ 1548 К забезпечується трубчасто-кільцевою КЗ петльового типу з 16 жаровими трубами. Турбіни приводу компресорів одноступінчасті з повітряним охолодженням

|              |               |          |        |      |                                                      |
|--------------|---------------|----------|--------|------|------------------------------------------------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата |          |        |      | <div>КР.142.6231м.03.01.ПЗ.</div> <div>Арк. 16</div> |
|              | Інв. № дубл.  |          |        |      |                                                      |
|              | Взам. інв. №  |          |        |      |                                                      |
|              | Підпис і дата |          |        |      |                                                      |
| Зм.          | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата |                                                      |

| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
|              |               |              |              |               |

Газотурбінний двигун ГТД 110 (рис.1.1) призначений для використання в складі парогазових установок потужністю 325 і 170 МВт із метою вироблення електричної і теплової енергії в базовому, напівпіковому і піковому режимах застосування. На базі ГТД 110 за вимогою замовника може бути створена однорухова установка ГТЭ-110 з електрогенератором.



Рисунок 1.1 - Газотурбинний двигун ГТД 110

По своїх техніко-економічних характеристиках ГТД 110 відповідає кращим світовим зразкам і є першою установкою такого класу, створеної в країнах колишнього Радянського Союзу, що має температуру газів на вході в турбіну 1210 С, КПД – 36%, концентрацію NOX у газах, що відходять – менш 50 мг/нм<sup>3</sup>.

Маса двигуна в 1,5-2 рази менше, а вартість майже на 30% нижче світових зразків. По технічних і екологічних параметрах ГТД 110 відповідає вимогам ДСТ 29328 і міжнародному стандарту AP1-616 на промислові газові турбіни.

Відмінною рисою двигуна ГТД 110 є його малі габарити і маса, що не перевищує 50 тонн. Це дозволяє здійснювати постачання двигуна на місце експлуатації в



цілком зібраному і випробуваному виді єдиним модулем на рамі в тепло і звукоізолюючому контейнері. Перед відправленням замовникові кожен зразок двигуна ГТД 110 проходить здавальні іспити з перевіркою його характеристик на номінальній потужності і пред'являється замовникові на відповідність параметрів, заданих у технічних умовах. Такий метод приймання газотурбінних двигунів і установок прийнятий в авіаційній і суднобудівній промисловості і дозволяє різко знизити вартість і час монтажних і пусконаладжувальних робіт з порівняння з традиційними енергетичними паротурбінними блоками. Загальний час монтажу і пусконаладжувальних робіт двигуна оцінюється приблизно в 1-1,5 місяця.

Привабливою особливістю ГТД 110 є можливість його установки на вже діючі електростанції.

У процесі експлуатації забезпечується сервісне обслуговування. Капітальний ремонт виробляється на заводі-виготовлювачі.

Даний двигун створений у результаті виробничої кооперації з російською компанією НПО "Сатурн". Розробка велася за замовленням РАО "Єдині енергетичні системи Росії". Перший досвідчений двигун був виготовлений у 1998 р. По 2000-й рік він відробив чотири дослідно-доводочних цикли на дизельному і газоподібному паливі. Испиту на заводському стенді НПКГ "Зоря"- "Машпроект" показали повну відповідність експериментальних характеристик ГТД 110 їхнім проектним значенням і підтвердили правильність закладених у конструкцію рішень.

Другий двигун, зібраний у серпні 2001 р., після заводських іспитів був установлений на Іванівської ГРЭС (Росія) і проходить подальші іспити в складі стенда ГТЭ-110 з видачею електричної потужності в енергосистему. Проведений перший етап іспитів підтвердив надійність усіх систем станції.

Після завершення іспитів аналогічні установки намічається поставити на Конаківську, Щекінську і Краснодарську ГРЭС, Калінінградську ТЭЦ-2, Північно-Західну ТЭЦ ("Лененерго"), Элистинську ГРЭС і деякі інші об'єкти РАО ЄЕС. Орієнтований попит на ГТД 110 за експертними оцінками на найближчі десять років складає близько 100 шт.

|               |      |          |        |      |                        |      |
|---------------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                        |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                        |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                        |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|               |      |          |        |      |                        | 18   |
|               |      |          |        |      |                        |      |

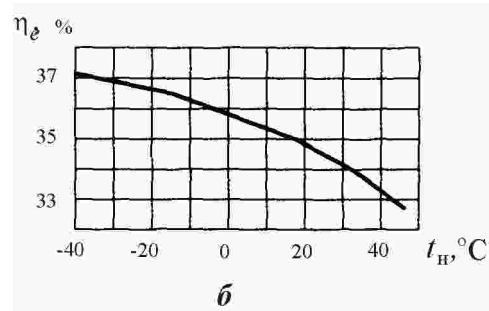
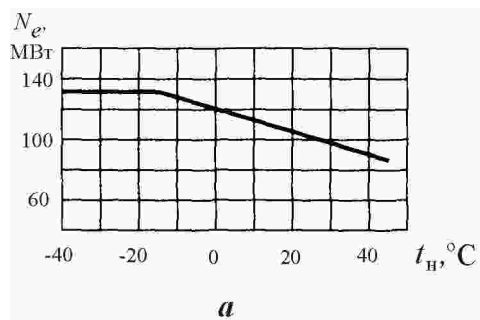


Рисунок 1.2 – Залежність потужності (а) і КПД (б) ГТД 110 від температури повітря на вході

Основні технічні характеристики ГТД 110 (в умовах ISO 2314) представлені в табл.1.1, експлуатаційні характеристики – на рис.1.2.

Таблиця 1.1

| Параметр                                                | Базовий режим                         | Піковий режим                        |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Номінальна потужність, МВт                              | 114,5                                 | 125                                  |
| ККД, %                                                  | 36                                    | 36,5                                 |
| Витрата повітря, кг/с                                   | 357                                   | 357                                  |
| Ступінь підвищення тиску                                | 14,7                                  | 15,0                                 |
| Температура газу перед турбіною, С                      | 1210                                  | 1268                                 |
| Витрата паливного газу ( $H_u = 50090$ кДж/кг), кг/год. | 22510                                 | 24220                                |
| Температура газу за ГТД, С                              | 517                                   | 547                                  |
| Частота обертання ротора ГТД, об/хв.                    | 3000                                  | 3000                                 |
| Ресурс до капітального ремонту, ч                       | 25000 при числі пусків не більш 300   | 4000 при числі пусків не більш 1000  |
| Ресурс до списання, ч                                   | 100000 при числі пусків не більш 1000 | 16000 при числі пусків не більш 5000 |
| Зміст NOX, (при 15% PRO2), не більш, мг/нм3             | 50                                    | —                                    |
| Довжина x ширина x висота, м                            | 5,7 x 3,7 x 4,0                       |                                      |
| Маса, т                                                 | 50                                    |                                      |

Російська сторона відносить створення ГТД 110 до числа пріоритетних розробок, упровадження яких дозволить ліквідувати наявне технологічне відставання електроенергетичного комплексу Росії від промислово розвинених країн. Передбачається, що двигун ГТД 110 стане основою гами двигунів потужністю від 60 до 160 МВт, застосовуваних у парогазових і енергетичних установках у діапазоні потужностей від 90 до 500 МВт із КПД від 55 до 58%.

|               |              |              |               |              |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 19   |



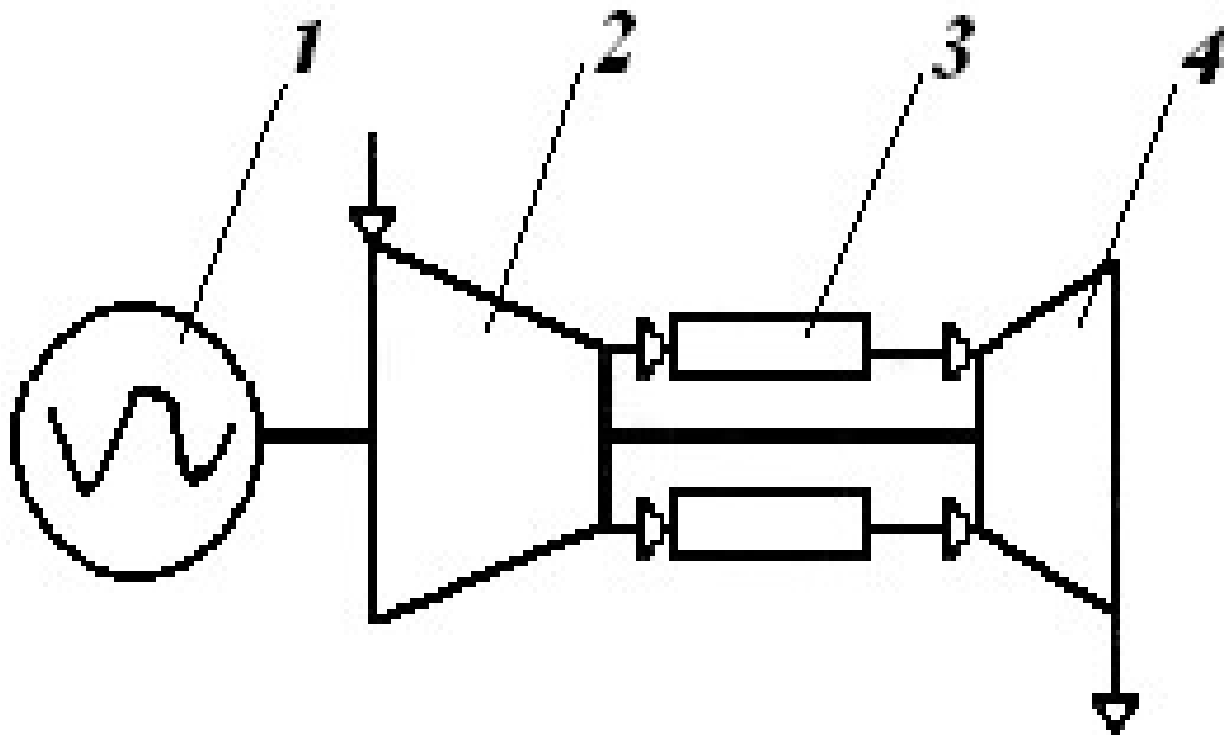


Рисунок 1.3 – ГТА простої схеми:

1 – електрогенератор; 2 - компресор; 3 – камера згоряння; 4 - турбіна приводу генератора

ГТД у складі подібного ГТА працює звичайно за термодинамічним циклом з підведенням тепла при постійному тиску (цикл Брайтона). Такий теоретичний цикл складається з двох ізоентроп і двох ізобар, як це показано на рис. 1.4.

Цикл побудований у координатах температура - ентропія. На рис. 1.2 проведені ізобари:  $P_{306}$  - атмосферний (зовнішній) тиск;  $P_1$  - тиск повітря перед компресором;  $P_2$  - тиск повітря на виході з компресора;  $P_3$  - тиск газу перед турбіною;  $P_4$  - тиск газу на виході з турбіни. Компресор ГТД забирає повітря з атмосфери з параметрами  $P_{306}$  і  $T_{306}$  та здійснює процес підвищення тиску від  $P_1, T_1$  до  $P_2, T_2$  у теоретичному ізоентропійному процесі і до  $P_2, T_2$  у дійсному політропічному процесі.

Таким чином,  $(1_{\text{зоб}}-1)$  - процес підведення повітря на вході в компресор ГТД, що супроводжується втратами повного тиску у вхідному пристрої ГТА. Реальний процес підвищення тиску  $(1-2)$  проходить з утратами енергії в ступенях компресора, а тому ентропія системи зростає ( рис. 1.4). Після компресора повітря надходить у КЗ, куди також подається і паливо. Підведення тепла до повітря в процесі горіння палива відбувається при практично постійному тиску (лінія 2-3). Параметри кінця проце-

су теплопідведення в КЗ ( $P_3$  і  $T_3$ ) характеризують стан робочого тіла перед турбіною ГТД. Унаслідок утрат повного тиску в КЗ тиск перед турбіною  $P_3$  на 3...5% менший, ніж на вході в КЗ. Далі відбувається послідовний процес розширення робочого тіла в турбіні приводу компресора до кінцевого тиску  $P_4$ . Теоретичний процес розширення газу (3-4) є ізоентропійним процесом, а дійсний (3-4) - політропічним. Параметри кінця процесу розширення газу ( $P_4$  і  $T_4$ ) характеризують стан робочого тіла за ГТД. Лінія (4-1<sub>зог</sub>) - умовний процес замикання термодинамічного циклу ГТА в атмосфері.

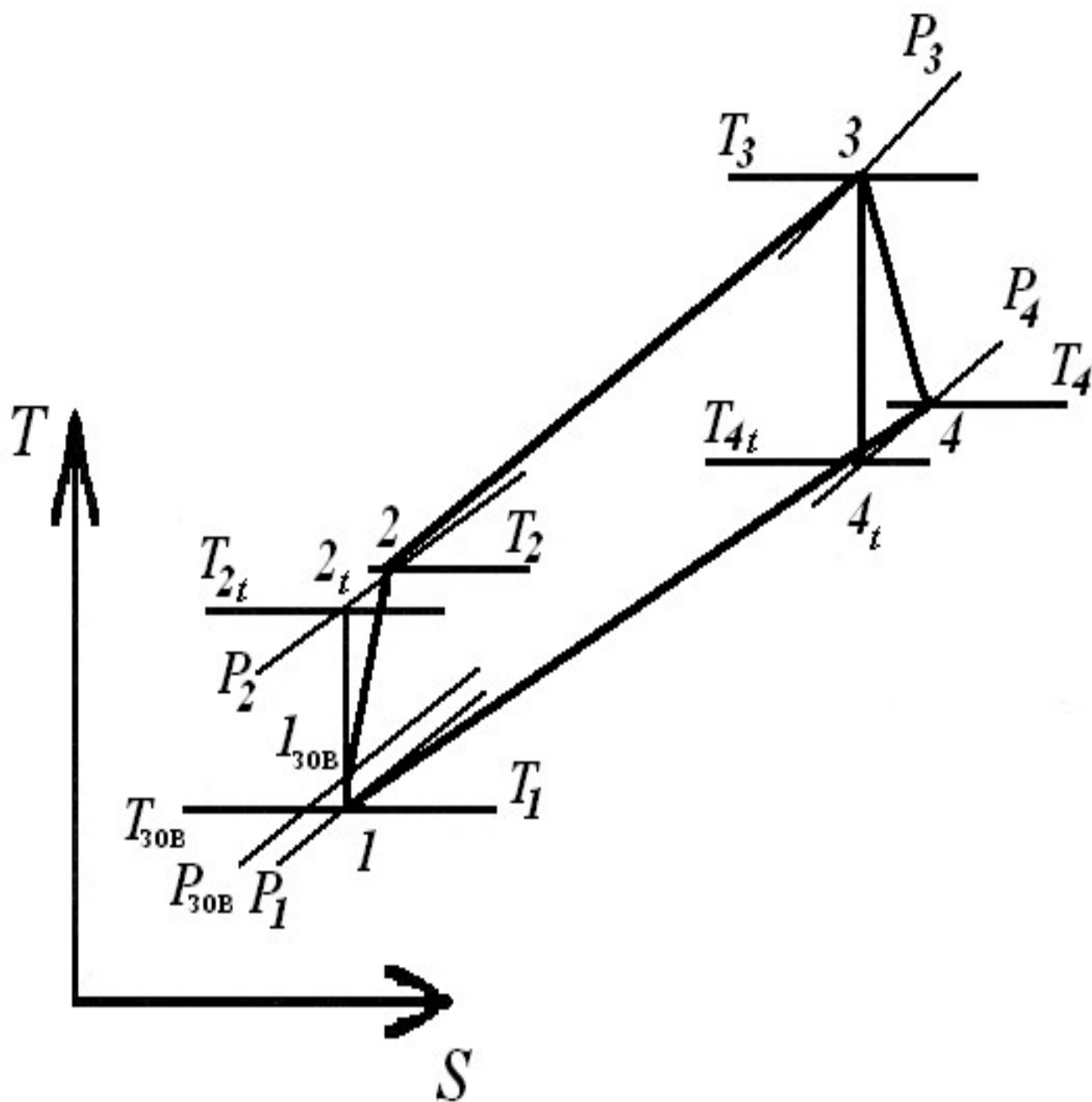


Рисунок 1.4 – Термодинамічний цикл ГТА простої схеми

|               |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Підпис і дата | Підпис і дата | Підпис і дата | Підпис і дата | Підпис і дата |
| Інв. № дубл.  | Інв. № дубл.  | Інв. № дубл.  | Інв. № дубл.  | Інв. № дубл.  |
| Взам. інв. №  | Взам. інв. №  | Взам. інв. №  | Взам. інв. №  | Взам. інв. №  |
| Інв. № подл.  | Інв. № подл.  | Інв. № подл.  | Інв. № подл.  | Інв. № подл.  |

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|----------|--------|------|

КР.142.6231м.03.01.ПЗ.

|      |
|------|
| Арк. |
| 22   |

Найважливішими показниками, що характеризують ефективність схеми і термодинамічного циклу ГТА, є його ККД та питома потужність. Ефективний ККД являє собою відношення корисної енергії, до повних витрат енергії палива в КЗ. Під питомою потужністю (питомою роботою) ГТА слід розуміти відношення його ефективної потужності до секундної витрати повітря через компресор ГТД. Таким чином,  $N_{e_{\text{нм}}} = \frac{N_e}{G_k}$ . Розмірність цієї величини - кВт/(кг/с) або кДж/кг. Відзначимо, що сучасні ГТА простої схеми при максимальній температурі в циклі  $T_3$  - 1100... 1500 К мають ККД 30...37 % і величину питомої потужності 140.. 300 кВт/(кг/с).

### 1.3 Оптимізація параметрів циклу ГТА

З використанням прикладного програмного забезпечення з бібліотеки навчальних програм кафедри «Турбін» здійснюємо оптимізаційне параметричне дослідження заданого об'єкту: термодинамічного циклу ГТА простої схеми, одноступінчатої чи багатоступінчастої газової турбіни, процесів горіння в КС ГТД і т.д.

Оптимізацію параметрів циклу ГТА виконуємо з використанням навчальної програми GTA1CC. Значення вихідних параметрів приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

| $T_3, \text{ К}$ | $T_n, \text{ К}$ | $T_d, \text{ К}$ | $g_e$  | $\eta_{ak}$ | $\eta_{at}$ | $\eta_{m_t}$ | $\eta_{kc}$ |
|------------------|------------------|------------------|--------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 1500             | 288              | 1080             | 0,0220 | 0,900       | 0,900       | 0,9900       | 0,9950      |

Задаємося інтервалом зміни параметра  $\pi_\Sigma$  від 16 до 34 із кроком 1, виконуємо коректування файлу вихідних даних

C:\STUDENT\GRUP5\isgta1cc.dat

і виконуємо розрахунок варіанта, використовуючи файл програми

C:\STUDENT\SPARTA\gta1cc.exe

За результатами розрахунку (табл. 1.2), що знаходиться у файлі

C:\STUDENT\GRUP5\rzgta1cc.dat

будуємо графік – рис.1.5 (Залежність ефективного КПД циклу та питомої потужності ГТА простої схеми від загальної ступеня підвищення тиску в циклі).

|               |              |              |               |              |                        |  |  |  |  |      |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |                        |  |  |  |  | Арк. |
|               |              |              |               |              |                        |  |  |  |  | 23   |
| Зм.           | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата         | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |  |  |  |  |      |

Перелік неописаних ідентифікаторів приведено в табл.1.3

Таблиця 1.3 – Список ідентифікаторів

| Ідентифікатор | Найменування параметра        | Розмірність |
|---------------|-------------------------------|-------------|
| QKN           | Міра підвищення тиску         | -           |
| UE            | Питомий ККД                   | -           |
| HU            | Питома потужність             | КВТ/(кг/с)  |
| T4            | Температура газу за турбіною  | К           |
| GOX           | Витрата охолоджуючого повітря | -           |
| AL            | Коефіцієнт надлишку повітря   | -           |

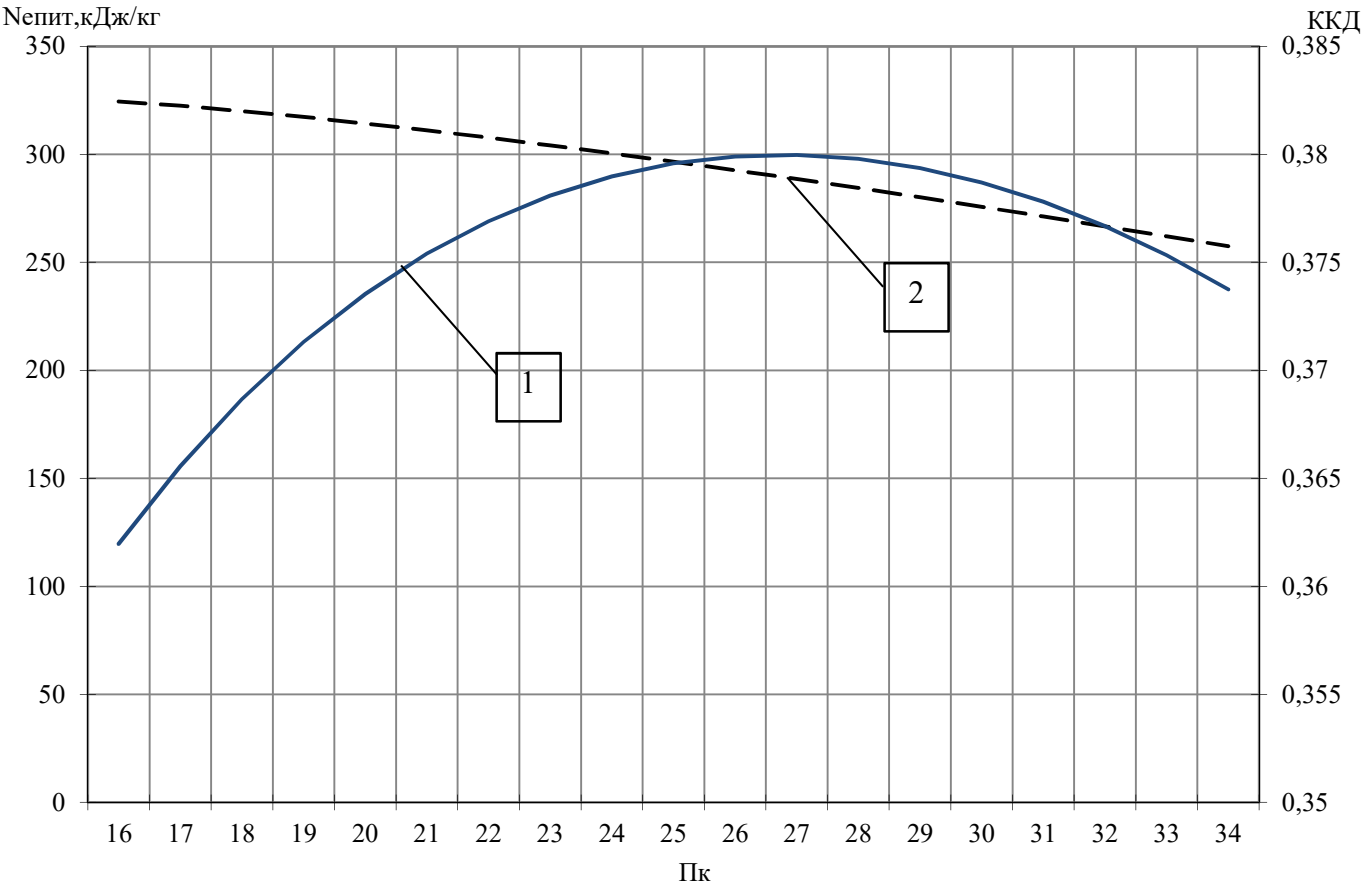


Рисунок 1.5 – Графіки залежностей  $\eta_e = f(\pi_{\kappa})$  і  $N_{enum} = f(\pi_{\kappa})$  відповідно ККД(1) та питомої потужності(2) від міри підвищення тиску в циклі

Аналізуючи графік приходимо до висновку, що оптимальне значення загально-го ступеня підвищення тиску повітря в циклі ГТА  $\pi_{\kappa} = 20$ .

|              |               |              |              |               |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |              |              |               |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |

# Результати розрахунку:

- $\eta_e$  (UTE) – ефективний КПД циклу ГТА;
- $N_{y\partial}$  (HU) – питома потужність у циклі ГТА,  $\frac{\text{кВт}}{\text{кг/с}}$ ;
- $T_2$  (T2) – температура повітря перед КС, К;
- $T_4$  (T4) – температура газу за турбіною, К;
- $n_{ox}$  (NOX) – число охолоджуваних вінців турбіни;
- $g_{ox}$  (GOX) – відносна витрата охолоджуваного повітря;
- $\alpha_o$  (ALO) – коефіцієнт надлишку повітря,

Таблиця 1.4 - Оптимізація параметрів циклу

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПОДПРОГРАММА GTA1CC  
РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГТУ ПРОСТОГО ЦИКЛА  
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ  
Студент гр.6231м Костріков В.А.

|                    |              |              |               |              |                                             |        |       |     |        |      |
|--------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------------------------------------|--------|-------|-----|--------|------|
| Підпис і дата      | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. | 01.ПРИЗНАК ЦИКЛА                            | 1      |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 02.ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТВД ГТД,К         | 1500.0 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 03.ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,К          | 288.0  |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 04.ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК,К | 1080.0 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 05.КПД ЭЛЕМЕНТАПНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА     | 0.9000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 05.КПД ЭЛЕМЕНТАПНОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ         | 0.9000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 06.МЕХАНИЧЕСКИЙ КПД ГТА                     | 0.9900 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 07.КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ КС          | 0.9950 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 08.НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK                    | 16.00  |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 09.КОНЕЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK                     | 34.00  |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 10.ШАГ СПУСКА ПО QK                         | 1.00   |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 12.КВПД ДЛЯ ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА             | 0.9800 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 13.КВПД ДЛЯ ПЕРЕХОДНИКОВ КОМПРЕССОРОВ       | 0.9950 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 14.КВПД ДЛЯ ОСНОВНОЙ КС                     | 0.9500 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 15.КВПД ДЛЯ ОПОРНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБИН           | 0.9950 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 16.КВПД ДЛЯ ГАЗООТВОДНОГО УСТРОЙСТВА        | 0.9850 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 17.УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА     | 0.0220 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 18.КВПД ДЛЯ РЕГЕНЕРАТОРА                    | 1.0000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 19.СТЕПЕНЬ РЕГЕНЕРАЦИИ                      | 0.0000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 20.КВПД ДЛЯ УТИЛИЗАЦИОННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА  | 1.0000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 21.ВНУТРЕННИЙ КПД УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПТ         | 0.0000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 22.НЕДООХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА В ПВО, ГРАД.      | 0.00   |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 23.КВПД ДЛЯ ПВО                             | 1.0000 |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 24.НЕДОГРЕВ ГАЗА В КСПП,ГРАД.               | 0.00   |       |     |        |      |
|                    |              |              |               |              | 25.КВПД ДЛЯ КСПП                            | 1.0000 |       |     |        |      |
| РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА |              |              |               |              |                                             |        |       |     |        |      |
| QK                 | UTE          | HU           | KO            | KD           | T2                                          | T4     | ONPT  | NOX | GOX    | ALO  |
| 16.0               | 0.36197      | 324.5        | 0.000         | 0.000        | 682.1                                       | 846.8  | 0.000 | 4.0 | 0.0849 | 2.91 |
| 17.0               | 0.36557      | 322.5        | 0.000         | 0.000        | 694.4                                       | 835.2  | 0.000 | 4.0 | 0.0869 | 2.94 |
| 18.0               | 0.36867      | 320.0        | 0.000         | 0.000        | 706.1                                       | 824.4  | 0.000 | 4.0 | 0.0891 | 2.98 |
|                    |              |              |               |              | КР.142.6231м.03.01.ПЗ.                      |        |       |     |        | Арк. |
|                    |              |              |               |              |                                             |        |       |     |        | 25   |
| Зм.                | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата         |                                             |        |       |     |        |      |



Продовж. табл. 1.4

|      |         |       |       |       |       |       |       |     |        |      |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|------|
| 19.0 | 0.37131 | 317.3 | 0.000 | 0.000 | 717.3 | 814.2 | 0.000 | 4.0 | 0.0912 | 3.02 |
| 20.0 | 0.37354 | 314.3 | 0.000 | 0.000 | 728.1 | 804.7 | 0.000 | 4.0 | 0.0934 | 3.06 |
| 21.0 | 0.37540 | 311.1 | 0.000 | 0.000 | 738.4 | 795.7 | 0.000 | 4.0 | 0.0957 | 3.10 |
| 22.0 | 0.37691 | 307.7 | 0.000 | 0.000 | 748.4 | 787.2 | 0.000 | 4.0 | 0.0980 | 3.14 |
| 23.0 | 0.37809 | 304.2 | 0.000 | 0.000 | 758.1 | 779.2 | 0.000 | 4.0 | 0.1003 | 3.18 |
| 24.0 | 0.37898 | 300.4 | 0.000 | 0.000 | 767.4 | 771.5 | 0.000 | 4.0 | 0.1027 | 3.22 |
| 25.0 | 0.37958 | 296.6 | 0.000 | 0.000 | 776.5 | 764.2 | 0.000 | 4.0 | 0.1052 | 3.26 |
| 26.0 | 0.37990 | 292.6 | 0.000 | 0.000 | 785.2 | 757.3 | 0.000 | 4.0 | 0.1077 | 3.29 |
| 27.0 | 0.37997 | 288.6 | 0.000 | 0.000 | 793.7 | 750.7 | 0.000 | 4.0 | 0.1103 | 3.33 |
| 28.0 | 0.37979 | 284.4 | 0.000 | 0.000 | 802.0 | 744.3 | 0.000 | 4.0 | 0.1129 | 3.37 |
| 29.0 | 0.37936 | 280.1 | 0.000 | 0.000 | 810.0 | 738.2 | 0.000 | 4.0 | 0.1156 | 3.41 |
| 30.0 | 0.37870 | 275.7 | 0.000 | 0.000 | 817.9 | 732.4 | 0.000 | 4.0 | 0.1184 | 3.44 |
| 31.0 | 0.37781 | 271.3 | 0.000 | 0.000 | 825.5 | 726.8 | 0.000 | 4.0 | 0.1213 | 3.48 |
| 32.0 | 0.37668 | 266.7 | 0.000 | 0.000 | 832.9 | 721.4 | 0.000 | 4.0 | 0.1242 | 3.52 |
| 33.0 | 0.37533 | 262.1 | 0.000 | 0.000 | 840.2 | 716.2 | 0.000 | 4.0 | 0.1272 | 3.55 |
| 34.0 | 0.37375 | 257.4 | 0.000 | 0.000 | 847.3 | 711.1 | 0.000 | 4.0 | 0.1304 | 3.59 |

### 1.4 Детальний тепловий розрахунок схеми ГТА на режимі повної потужності

Програма "GTA2SBE" призначена для виконання детального теплового розрахунку одно каскадного блокованого енергетичного ГТА на режимі повної потужності.

Запуск програми на виконання здійснюється файлом gta2sbe.exe, що розміщується у директорії SAPRTA.

Вихідні дані для розрахунку варіанту теплової схеми ГТА готуються студентом шляхом редагування файлу isgt2sbe.dat, який знаходиться у директорії GRUP5.

Розшифровка ідентифікаторів параметрів наведена у табл. 1.5

Таблиця 1.5 - Розшифровка ідентифікаторів параметрів

| Ідентифікатор | Найменування параметра                            | Розмірність |
|---------------|---------------------------------------------------|-------------|
| AK(I)         | Коефіцієнт витрати компресора ГТД                 |             |
| BD            | "Недогрів" газу у КЗПП до $T_3$                   | К           |
| BET(J)        | Коефіцієнт витрати турбіни ГТД                    |             |
| BO            | Недоохолодження повітря в компресорі              |             |
| C             | Формальна ознака схеми ГТА                        |             |
| CK            | Кратність циркуляції води в паровому конденсаторі |             |
| DB            | Ознака розміщення ППО у компресорі ГТД            |             |
| DTI           | Мінімальний температурний напір за ВП УПГ         | град        |
| EPSGE         | Відносна витрата охолоджуючого повітря            |             |
| HBO           | КВПТ у проміжному повітроохолоджувачі             |             |
| HBX           | КВПТ вхідного пристрою ГТА                        |             |
| HDKS          | КВПТ КЗПП                                         |             |

|              |              |              |               |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Підпис і дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |  |  |  |  | Арк. |
|              |              |              |               |               |                        |  |  |  |  | 26   |
| Зм.          | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата          |                        |  |  |  |  |      |

Продовж. табл. 1.5

|        |                                                                   |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| HT     | КВПТ проточної частини опорного вінця турбіни                     |     |
| IK     | Кількість компресорів у схемі ГТД                                 |     |
| IRT    | Ознака типу використовуваного палива                              |     |
| JD     | Номер турбіни, розміщеної за КЗПП                                 |     |
| JT     | Число турбін у схемі ГТД                                          |     |
| KD     | Параметр розподілу роботи турбіни                                 |     |
| KO     | Параметр розподілу роботи компресора                              |     |
| MI(J)  | Елемент масиву кінематичних зв'язків                              |     |
| NN     | Ефективна потужність ГТА                                          | кВт |
| P      | Тиск пари в сепараторі УПГ                                        | МПа |
| PN     | Атмосферний тиск повітря                                          | МПа |
| PZ     | Тиск пари в ПК ТУК                                                | МПа |
| QKN    | Ступінь підвищення тиску у циклі ГТА                              |     |
| R      | Ступінь регенерації у циклі ГТА                                   |     |
| GPN    | Відносний розмір відбору насиченої пари із УПГ                    |     |
| RGPP   | Відносний розмір відбору перегрітої пари перед ПТ                 |     |
| T3N    | Температура газу на вході у ТВТ ГТД                               | К   |
| TD     | Припустима температура металу лопаток                             | К   |
| TN     | Температура атмосферного повітря на вході у ГТА                   | К   |
| TPB    | Температура живильної води УПГ                                    | К   |
| HNO    | КВПТ газовідвідного пристрою                                      |     |
| HNP    | КВПТ по газовій стороні регенератора                              |     |
| HK     | КВПТ перехідника компресора                                       |     |
| HKS    | КВПТ основної камери згоряння                                     |     |
| HKY    | КВПТ газового тракту УПГ                                          |     |
| HPB    | КВПТ по повітряній стороні регенератора                           |     |
| URED   | Механічний ККД редуктора ГТА                                      |     |
| UT(J)  | Внутрішній адіабатичний ККД турбіни ГТД                           |     |
| UTP    | Внутрішній ККД парової турбін                                     |     |
| XEE(J) | Параметр розподілу ступенів підвищення тиску між компресорами ГТД |     |
| Y      | Формальна ознака схеми ГТА                                        |     |
| TRP    | Температура перегрітої пари на виході з УПГ                       | К   |
| UKS    | Коефіцієнт повноти згоряння КЗ                                    |     |
| UM(J)  | Механічний ККД турбіни                                            |     |
| UMTP   | Механічний ККД парової турбіни                                    |     |
| UNI    | ККД насосів ТУК                                                   |     |
| UPC    | ККД елементарної ступені компресора                               |     |

|              |               |              |              |               |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |              |              |               |
|              |               |              |              |               |
|              |               |              |              |               |
|              |               |              |              |               |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 27   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Таблица 1.6 - Розрахунок схеми ГТА на режимі повної потужності  
 РАСЧЕТ СХЕМЫ ОДНОКАСКАДНОГО БЛОКИРОВАННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГТА  
 Студент гр.6231м Костріков В.А.

|                                                            |         |
|------------------------------------------------------------|---------|
| 01.ПРИЗНАК БАЗОВОГО ГТД,IGTD                               | 1       |
| 02.ПРИЗНАК ТИПА ТОПЛИВА,IRT (1-ДИЗЕЛЬНОЕ; 2-ПРИРОДНЫЙ ГАЗ) | 2       |
| 03.ЧИСЛО СТУПЕНЕЙ ТУРБИНЫ,ZT                               | 4       |
| 04.ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТВД, T3N,К                       | 1500.0  |
| 05.ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,TN,К                      | 288.0   |
| 06.ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК,TD,К             | 1080.0  |
| 07.ДАВЛЕНИЕ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,PN,МПА                       | 0.1013  |
| 08.ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,FIO     | 0.6000  |
| 09.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА,UAK                | 0.9000  |
| 10.К.П.Д. РЕДУКТОРА,UR                                     | 1.0000  |
| 11.К.П.Д. КАМЕРЫ СГОРАНИЯ,UKS                              | 0.9950  |
| 12.ВНУТРЕННИЙ АДИАБАТИЧЕСКИЙ К.П.Д. ТУРБИНЫ, UTI           | 0.9000  |
| 13.МЕХАНИЧЕСКИЙ К.П.Д. ТУРБИНЫ, UM1                        | 1.00    |
| 14.ОБЩАЯ СТЕПЕНЬ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ЦИКЛЕ,QKN            | 20.0000 |
| 15.К.В.П.Д. ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА,NBX                        | 0.9800  |
| 16.К.В.П.Д. КАМЕРЫ СГОРАНИЯ,NKS                            | 0.9500  |
| 17.К.В.П.Д. ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОПОРНОГО ВЕНЦА ТУРБИНЫ,NT      | 0.9950  |
| 18.К.В.П.Д. ГАЗОТВОДНОГО УСТРОЙСТВА ,ННО                   | 0.9850  |
| 19.ТЕМП. ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА 1-Й СТУПЕНИ ТУРБИНЫ,TOXB     | 705.0   |
| 20.ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ,NE,КВТ                             | 60000.0 |

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА СХЕМЫ  
 ГТА ПРОСТОГО ЦИКЛА ( СХЕМА 1 )  
 БАЗОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ - GTD 110

КОМПРЕССОР

| QK     | GK     | UK     | T1    | T2    | DTK   | P1     | P2     | CPB        | KB    |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|------------|-------|
|        | КГ/С   |        | К     | К     | ГРАД  | МПА    | МПА    | КДЖ/(КГ*К) |       |
| 20.000 | 195.85 | 0.8538 | 288.0 | 723.4 | 435.4 | 0.0993 | 1.9855 | 1.042      | 1.382 |

КАМЕРА СГОРАНИЯ

| T1KS   | T2KS    | P1KS   | P2KS   | OGT     | AL   | OGPNB  | GBKS    | GTH     |
|--------|---------|--------|--------|---------|------|--------|---------|---------|
| К      | К       | МПА    | МПА    |         |      |        | КГ/С    | КГ/Ч    |
| 723.36 | 1500.00 | 1.9855 | 1.8862 | 0.01938 | 3.00 | 0.0068 | 167.479 | 11685.4 |

ТУРБИНА ГТД

| QT     | GT      | GNO        | UT     | T3      | T4     | DTT    | ODP    |
|--------|---------|------------|--------|---------|--------|--------|--------|
|        | КГ/С    | КГ/С       | К      | К       |        |        |        |
| 18.341 | 170.725 | 199.104    | 0.9000 | 1500.00 | 794.43 | 678.32 | 0.0078 |
| P3     | P4      | CRPH       | KPH    | BET     | OGOХ1  | OGOХ2  | OGOХ3  |
| МПА    | МПА     | КДЖ/(КГ*К) |        |         |        |        |        |
| 1.8862 | 0.1028  | 1.2099     | 1.3157 | 0.8717  | 0.0767 | 0.0403 | 0.0029 |

ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГТА

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ГТА,КВТ/(КГ/С)              | 300.23 |
| ЭФФЕКТИВНЫЙ К.П.Д. ГТА                        | 0.3699 |
| УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА ГТА,КГ/(КВТ*Ч)        | 0.1948 |
| ТЕМПЕРАТУРА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ЗА ГТА,К          | 794.43 |
| СУММАРНЫЙ ОТНОСИТ. ОТБОР ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА | 0.1449 |

|               |              |              |               |              |     |                        |      |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-----|------------------------|------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |     | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|               |              |              |               |              |     |                        | 28   |
|               |              |              |               |              | Зм. |                        | Арк. |

## 1.5 Габаритно - компоновочний розрахунок ГТД та побудова ескізу його меридіонального перетину

### 1.5.1 Оцінка габаритного розміру осьового компресора

Вихідні параметри та дані для габаритного розрахунку компресора:

$$P_{11} = 0,09930 \text{ МПа}; P_{21} = 1,9855 \text{ МПа}; T_{11} = 288 \text{ К}; T_{21} = 723,4 \text{ К}; G_{\kappa 1} = 195,85 \text{ кг/с};$$

$$\kappa_{\kappa 21} = 1,382, c_{\text{пр}} = 1,042 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; R_{\text{р}} = 0,287 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Вибираємо матеріал робочих лопаток ЭИ696:  $\sigma_k = 900$  МПа ;  $\rho_{\text{мк}} = 7900$  кг/м<sup>3</sup>.

Беремо колову швидкість на зовнішньому діаметрі робочого колеса першої ступені компресора

$$u_{H1} = 280 \quad \text{м/с.}$$

Приймаємо осьову складову абсолютної швидкості для вхідного перетину компресора

$$\overline{c_{a1}} = 0,5.$$

## Приймаємо втулкове відношення

$$\bar{d} = \frac{D_{e1}}{D_{y1}} = 0,4 .$$

### 1.5.1.1 Розрахунок габаритів вхідного перетину компресора

## Осьова швидкість на вході у компресор

$$c_{a1} = u_{u1} \cdot \bar{c}_{a1} = 140 \text{ м/с.}$$

### Коефіцієнт швидкості для вхідного перетину компресора

$$\lambda_{c_{a1}} = \frac{c_{a1}}{18,32 \cdot \sqrt{T_1}} = 0,4521$$

## Газодинамічна функція

$$q(\lambda_{c_{a1}}) = \lambda_{c_{a1}} \cdot \left[ \frac{k_{e1} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{k_{e1} - 1}{k_{e1} + 1} \cdot \lambda_{c_{a1}}^2 \right) \right]^{\frac{1}{k_{e1} - 1}} = 0,6547$$

### Величина кільцевої площі вхідного перетину

$$F_1 = \frac{G_k \cdot \sqrt{T_1}}{0,0403 \cdot P_1 \cdot q(\lambda_{c-1})} = 1,2706 \text{ M}^2.$$

### Зовнішній діаметр вхідного перетину компресора

$D_{n1}$

### 1.5.1.1 Розрахунок габаритів вхідного перетину компресора

Осьова швидкість на вході у компресор

$$c_{a1} = u_{n1} \cdot \bar{c}_{a1} = 140 \text{ м/с.}$$

Коефіцієнт швидкості для вхідного перетину компресора

$$\lambda_{c_{a1}} = \frac{c_{a1}}{18,32 \cdot \sqrt{T_1}} = 0,4521$$

Газодинамічна функція

$$q(\lambda_{c_{a1}}) = \lambda_{c_{a1}} \cdot \left[ \frac{k_{e1} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{k_{e1} - 1}{k_{e1} + 1} \cdot \lambda_{c_{a1}}^2 \right) \right]^{\frac{1}{k_{e1} - 1}} = 0,6547$$

Величина кільцевої площі вхідного перетину

$$F_1 = \frac{G_k \cdot \sqrt{T_1}}{0,0403 \cdot P_1 \cdot q(\lambda_{c_{a1}})} = 1,2706 \text{ м}^2.$$

Зовнішній діаметр вхідного перетину компресора

$$D_{n1} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi \cdot (1 - \bar{d}^2)}} = 1,388 \text{ M.}$$

### Внутрішній діаметр на вході до компресора

$$D_{\varepsilon 1} = \bar{d} \cdot D_{H1} = 0,555 \text{ м.}$$

### Середній діаметр на вході до компресора

$$D_{c1} = \frac{D_{H1} + D_{\epsilon 1}}{2} = 0,972 \text{ м.}$$

## Висота лопатки першої ступені

$$l_{\kappa 1} = \frac{D_{\pi 1} - D_{\sigma 1}}{2} = 0,417 \text{ м.}$$

### Частота обертання ротора компресора

$$n_{\kappa} = \frac{60 \cdot u_{H1}}{\pi \cdot D_{H1}} = 3000 \text{ об/хв}$$

### Напруга розтягу в робочих лопатках першої ступені

$$\sigma_{\kappa 1} = 9,8 \cdot \left( \frac{\rho_{m\kappa}}{7850} \right) \cdot n_{\kappa}^2 \cdot F_1 = 113 \text{ МПа.}$$

### Коефіцієнт запасу міцності робочої лопатки першої ступені

$$K_{np1} = \frac{\sigma_K}{\sigma_{K1}} = 7,96 > (1,5...2,0).$$

### 1.5.1.2 Розрахунок габаритів вихідного перетину компресора

### Осьова швидкість на виході з компресора

$$c_{a2} = (0,9...1,0) \cdot c_{a1} = 126 \text{ М/с.}$$

### Коефіцієнт швидкості для вихідного перетину компресора

$$\lambda_{c_{a2}} = \frac{C_{a2}}{\sqrt{2 \cdot \frac{K_{g2}}{K_{g2} + 1} \cdot T_2 \cdot R_g}} = 0,2567$$

$$\text{де } \kappa_{\epsilon_2} = 1,382; R_{\epsilon} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

## Газодинамічна функція

$$q(\lambda_{c_{a2}}) = \lambda_{c_{a2}} \cdot \left[ \frac{k_{c2} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{k_{c2} - 1}{k_{c2} + 1} \cdot \lambda_{c_{a2}}^2 \right) \right]^{\frac{1}{k_{c2} - 1}} = 0,3945$$

|               |                                                                                                                                                                                                                                                    |          |        |      |  |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|------|--|
| Підпис і дата | Коефіцієнт запасу міцності робочої лопатки першої ступені                                                                                                                                                                                          |          |        |      |  |
|               | $\kappa_{np1} = \frac{\sigma_{\kappa}}{\sigma_{\kappa1}} = 7,96 > (1,5...2,0).$                                                                                                                                                                    |          |        |      |  |
| Інв. № дубл.  | 1.5.1.2 Розрахунок габаритів вихідного перетину компресора                                                                                                                                                                                         |          |        |      |  |
|               | Осьова швидкість на виході з компресора                                                                                                                                                                                                            |          |        |      |  |
|               | $c_{a2} = (0,9...1,0) \cdot c_{a1} = 126 \text{ м/с}.$                                                                                                                                                                                             |          |        |      |  |
| Взам. інв. №  | Коефіцієнт швидкості для вихідного перетину компресора                                                                                                                                                                                             |          |        |      |  |
|               | $\lambda_{c_{a2}} = \frac{c_{a2}}{\sqrt{2 \cdot \frac{\kappa_{\epsilon2}}{\kappa_{\epsilon2} + 1} \cdot T_2 \cdot R_{\epsilon}}} = 0,2567$                                                                                                         |          |        |      |  |
| Підпис і дата | де $\kappa_{\epsilon2} = 1,382$ ; $R_{\epsilon} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$                                                                                                                                                 |          |        |      |  |
|               | Газодинамічна функція                                                                                                                                                                                                                              |          |        |      |  |
|               | $q(\lambda_{c_{a2}}) = \lambda_{c_{a2}} \cdot \left[ \frac{\kappa_{\epsilon2} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\kappa_{\epsilon2} - 1}{\kappa_{\epsilon2} + 1} \cdot \lambda_{c_{a2}}^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa_{\epsilon2} - 1}} = 0,3945$ |          |        |      |  |
| Інв. № подл.  |                                                                                                                                                                                                                                                    |          |        |      |  |
|               |                                                                                                                                                                                                                                                    |          |        |      |  |
|               |                                                                                                                                                                                                                                                    |          |        |      |  |
| Зм.           | Арк.                                                                                                                                                                                                                                               | № докум. | Підпис | Дата |  |

КР.142.6231м.03.01.ПЗ.

|      |
|------|
| Арк. |
| 30   |

### Величина кільцевої площі вихідного перетину

$$F_2 = \frac{G_{\kappa} \cdot \sqrt{T_2}}{\sqrt{\frac{\kappa_{\theta_2}}{R_{\theta}} \cdot \left(\frac{2}{\kappa_{\theta_2} + 1}\right)^{\frac{\kappa_{\theta_2} + 1}{\kappa_{\theta_2} - 1}} \cdot P_2 \cdot q(\lambda_{c_{a_2}})}} = 0,1671 \text{ m}^2$$

### Діаметрально-габаритні розміри вихідного перетину компресора

$$D_h = \text{const.}$$

$$D_{h2} = D_{h1} = 1,388 \text{ M}$$

$$D_{c2} = \frac{D_h + D_e}{2} = 1,349 \text{ M};$$

$$D_{e2} = \sqrt{\left(D_{h2}^2 - \frac{4 \cdot F_2}{\pi \cdot D_{h2}}\right)} = 1,309 \text{ M.}$$

### Висота лопатки останньої ступені компресора

$$l_{\kappa 2} = \frac{D_{\text{н}2} - D_{\text{в}2}}{2} = 0,04 \text{ м.}$$

### 1.5.1.3 Оцінка числа ступенів і осьового габариту компресора

### Побудова ескізу його меридіонального перетину

## Число ступенів компресора

$$z_K = \text{цїлє} \frac{\lg \pi_K}{\lg \pi_{\text{CTK}}} = 15,$$

де  $\pi_{\text{CTK}} = 1,22$ .

## Осьовий габарит компресора

$$F_{cp_k} = \frac{F_1 + F_2}{2} = 0,7189 \text{ M}^2.$$

## Діаметрально-габаритні розміри середнього ступеня компресора

$$D_{\text{н}} = \text{const.}$$

$$D_{\text{нс}} = 1,388 \text{ М;}$$

$$D_{\text{бс}} = \sqrt{\left(D_{\text{нс}}^2 - \frac{4 \cdot F_{\text{срк}}}{\pi \cdot D_{\text{нс}}}\right)} = 1,005 \text{ М;}$$

$$D_{\text{сс}} = \frac{D_{\text{нс}} + D_{\text{бс}}}{2} = 1,197 \text{ М;}$$

|               |                                                                                                                                     |          |        |      |                        |      |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Підпис і дата | Побудова ескізу його меридіонального перетину                                                                                       |          |        |      |                        |      |
|               | Число ступенів компресора                                                                                                           |          |        |      |                        |      |
|               | $z_{\kappa} = \text{цїле} \frac{\lg \pi_{\kappa}}{\lg \pi_{\text{ст } \kappa}} = 15,$                                               |          |        |      |                        |      |
| Інв. № дубл.  | де $\pi_{\text{ст } \kappa} = 1,22$ .                                                                                               |          |        |      |                        |      |
|               | Осьовий габарит компресора                                                                                                          |          |        |      |                        |      |
|               | $F_{\text{сп } \kappa} = \frac{F_1 + F_2}{2} = 0,7189 \text{ м}^2.$                                                                 |          |        |      |                        |      |
| Взам. інв. №  | Діаметрально-габаритні розміри середнього ступеня компресора                                                                        |          |        |      |                        |      |
|               | $D_{\text{н}} = \text{const}.$                                                                                                      |          |        |      |                        |      |
|               | $D_{\text{нс}} = 1,388 \text{ м};$                                                                                                  |          |        |      |                        |      |
| Підпис і дата | $D_{\text{вс}} = \sqrt{\left( D_{\text{нс}}^2 - \frac{4 \cdot F_{\text{спк}}}{\pi \cdot D_{\text{нс}}} \right)} = 1,005 \text{ м};$ |          |        |      |                        |      |
|               | $D_{\text{сс}} = \frac{D_{\text{нс}} + D_{\text{вс}}}{2} = 1,197 \text{ м};$                                                        |          |        |      |                        |      |
| Інв. № подл.  |                                                                                                                                     |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |      |
|               |                                                                                                                                     |          |        |      |                        | Арк. |
|               |                                                                                                                                     |          |        |      |                        | 31   |
| Зм.           | Арк.                                                                                                                                | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

$$l_{\kappa c} = \frac{D_{\kappa c} - D_{вс}}{2} = 0,192 \text{ м.}$$

Розрахункова модель ступеня

Відносна висота лопатки компресорної ступені

$$g_{\kappa c} = \frac{D_{cc}}{l_{\kappa c}} = 6,23$$

Відносна ширина рішати компресорної лопатки та відносний осьовий зазор

$$\left(\frac{b}{l}\right); \left(\frac{\delta}{l}\right) = A_0 + A_1 \cdot g_{\kappa c} + A_2 \cdot g_{\kappa c}^2 + A_3 \cdot g_{\kappa c}^3$$

Таблиця 1.7

| Параметр                          | Інтервал    | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub>        | Розрахунок |
|-----------------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|------------|
| $\left(\frac{b}{l}\right)_p$      | 0,3...0,72  | 0,38388        | 0,006937       | 0,000538       | -0,3·10 <sup>-5</sup> | 0,4473     |
| $\left(\frac{b}{l}\right)_h$      | 0,28...0,7  | 0,3109         | 0,011753       | 0,000183       | 0,11·10 <sup>-4</sup> | 0,3939     |
| $\left(\frac{\delta}{l}\right)_p$ | 0,1...0,35  | 0,12526        | 0,001579       | 0,000334       | 0,13·10 <sup>-4</sup> | 0,1512     |
| $\left(\frac{\delta}{l}\right)_h$ | 0,09...0,32 | 0,08886        | 0,004524       | 0,000218       | 0,13·10 <sup>-4</sup> | 0,1286     |

Осьовий габарит ступені компресора

$$L_{ст \kappa} = l_{\kappa c} \cdot \left[ \left(\frac{b}{l}\right)_p + \left(\frac{\delta}{l}\right)_p + \left(\frac{b}{l}\right)_h + \left(\frac{\delta}{l}\right)_h \right] = 0,2152 \text{ м,}$$

Довжина компресора

$$L_{\kappa} = L_{ст \kappa c} \cdot z_{\kappa} = 3,228 \text{ м.}$$

Довжина лемніскати вхідного пристрою

$$L_{\epsilon y} = (0,16...0,22) \cdot D_{h1} = 0,222 \text{ м.}$$

Осьовий габарит переднього корпусу компресора

$$L_{\kappa \kappa 1} = (0,42...0,48) \cdot D_{h1} = 0,583 \text{ м.}$$

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дубл.  |  |
| Взам. інв. №  |  |
| Підпис і дата |  |
| Інв. № подл.  |  |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 32   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

### 1.5.2 Оцінка габаритів камери згоряння ГТД

Вихідні параметри та дані для габаритного розрахунку КЗ:

$P_{1\text{КЗ}} = 1,9855 \text{ МПа}; T_{1\text{КЗ}} = 723,4 \text{ К}; G_{\text{ТЧ}} = 11685.4 \text{ кг/год}; G_{\text{ВКС}} = 167.48 \text{ кг/с};$   
 $\eta_{\text{КЗ}} = 0,995; H_u = 42915 \text{ кДж/кг}; L_o = 14,49 \text{ кг/кг}$

Об’ємна теплонапруженість для жарових труб

$$Q_v = 1000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}.$$

Сумарний об’єм усіх жарових труб КЗ

$$V_{\text{КЗ}} = \frac{H_u \cdot G_{\text{ТЧ}} \cdot \eta_{\text{КЗ}}}{Q_v \cdot P_{1\text{КЗ}}} = 0,2514 \text{ м}^3.$$

Кількість жарових труб

$$n_{\text{ЖТ}} = 20.$$

Об’єм однієї жарової труби

$$g_{\text{ЖТ}} = \frac{V_{\text{КЗ}}}{n_{\text{ЖТ}}} = 0,0126 \text{ м}^3.$$

Діаметр однієї жарової труби

$$d_{\text{ЖТ}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g_{\text{ЖТ}}}{a \cdot \pi \cdot \bar{l}}} = 0,191 \text{ м},$$

де  $a = 0,7$  ;  $\bar{l} = 3,3$

Довжина жарової труби

$$l_{\text{ЖТ}} = d_{\text{ЖТ}} \cdot \bar{l} = 0,63 \text{ м}.$$

Зазор між жаровими трубами

$$e = 0,47 \cdot d_{\text{ЖТ}} = 0,09 \text{ м}.$$

Середній діаметр розміщення жарових труб

$$D_{\text{КЗ}} = \frac{d_{\text{ЖТ}} + e}{\sin \frac{180^\circ}{n_{\text{ЖТ}}}} = 1.796 \text{ м}.$$

Приймаємо протитокову камеру згоряння.

Площа перетину, яка зайнята жаровими трубами

$$F_{\text{КЗЖТ}} = \frac{\pi d_{\text{ЖТ}}^2}{4} \cdot n_{\text{ЖТ}} = 0,573 \text{ м}^2.$$

|              |               |              |              |               |     |      |          |        |      |                        |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-----|------|----------|--------|------|------------------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |     |      |          |        |      | Арк.                   |
|              |               |              |              |               |     |      |          |        |      | 33                     |
|              |               |              |              |               | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |



Сумарна площа кільцевого каналу

$$F_{\text{кк}\Sigma} = 2,2 \cdot F_{\text{ккжт}} = 1,433 \text{ м}^2.$$

Діаметр зовнішнього кожуху КЗ

$$D_{\text{нкк}} = D_{\text{цкк}} + \frac{F_{\text{кк}\Sigma}}{\pi \cdot D_{\text{цкк}}} = 2,05 \text{ м.}$$

Діаметр внутрішнього кожуху КЗ

$$D_{\text{вкк}} = D_{\text{цкк}} - \frac{F_{\text{кк}\Sigma}}{\pi \cdot D_{\text{цкк}}} = 1,542 \text{ м.}$$

Довжина осерадіального дифузора

$$L_{\text{орд}} = (0,28 \dots 0,46) \cdot D_{\text{цк}} = 0,405 \text{ м.}$$

Довжина камери згоряння

$$L_{\text{кк}} = (1,16 \dots 1,18) \cdot l_{\text{жт}} = 0,731 \text{ м.}$$

### 1.5.3 Визначення габаритних розмірів турбіни ГТД

Вихідні параметри та дані для габаритного розрахунку турбіни:

$$G_m = 170,725 \text{ кг/с}; \quad T_3 = 1500 \text{ К}; \quad T_4 = 794,43 \text{ К}; \quad P_3 = 1,8862 \text{ МПа}; \quad P_4 = 0,1028 \text{ МПа}; \quad \eta_t^* = 0,90;$$

$$n_T = 3000 \text{ об/хв.}$$

Матеріал робочих лопаток: сплав ЭИ696, щільність  $\rho_m = 7900 \text{ кг/м}^3$ .

Тип проточної частини турбіни:

$$D_c = \text{const};$$

$$D_{\text{с3}} = D_{\text{цкк}}; \quad D_{\text{с3}} = 1,796 \text{ м}$$

#### 1.5.3.1 Оцінка параметрів першої ступені турбіни та її габаритів

Кількість ступенів

$$Z_T = \text{цїле} \frac{\lg T_4 - \lg T_3}{\lg \left[ 1 - \left( \frac{\Delta T}{T} \right)_{\text{ст}} \right]} = 3,91,$$

де  $\left( \frac{\Delta T}{T} \right)_{\text{ст}} = 0,15$ . Приймаємо  $Z_T = 4$ .

Ізоентропний теплоперепад на турбіну

$$H_{\text{ад}}^* = (1 + \xi_{\text{вих}}) \cdot \frac{c_{\text{пр}} \cdot \Delta T_t}{\eta_t^*} = 957 \text{ кДж/кг},$$

|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
|---------------|------|--------------|--------|--------------|------------------------|---------------|--|--------------|------|
| Підпис і дата |      | Інв. № дубл. |        | Взам. інв. № |                        | Підпис і дата |  | Інв. № подл. |      |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
| Зм.           | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата         | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |               |  |              | Арк. |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              | 34   |

де  $\xi_{вих} = 0,05$ ;  $c_{pr}=1,2099$  кДж/кг;  $\Delta T_r = 678,32$  К.

Відносна висота лопатки

$$g_t = \frac{D_{ct}}{l_{pt}} = 24 \text{ Приймаємо у першому наближені.}$$

Оптимальна величина реактивності

$$\rho_1 = \rho_k + \frac{2g_t - 1}{g_t^2} = 0,2166 < 0,5,$$

де  $\rho_k = 0,135$ .

Швидкість газу на виході із соплової решітки першої ступені

$$c_1 = \varphi_{c1} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{H_{ad}^*}{Z_T} \cdot (1 - \rho_1)} = 594 \text{ м/с,}$$

де  $\varphi_{c1} = 0,97$ .

Коефіцієнт швидкості для вхідного перетину

$$\lambda_{c1} = \frac{c_1}{\sqrt{2 \cdot \frac{\kappa_{r3}}{\kappa_{r3} + 1} \cdot T_{31} \cdot R_r}} = 0,8478$$

Газодинамічна функція

$$q(\lambda_{c1}) = \lambda_{c1} \cdot \left[ \frac{\kappa_{r3} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\kappa_{r3} - 1}{\kappa_{r3} + 1} \cdot \lambda_{c1}^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa_{r3} - 1}} = 0,9729$$

Величина кільцевої площі вхідного перетину

$$F_{3c} = \frac{G_r \cdot \sqrt{T_3}}{\sqrt{\frac{\kappa_{r3}}{R_r} \cdot \left( \frac{2}{\kappa_{r3} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{r3} + 1}{\kappa_{r3} - 1}} \cdot P_3 \cdot q(\lambda_{c1}) \cdot \sin \alpha_{11}}} = 0,377 \text{ м}^2,$$

де  $\alpha_{11} = 14^\circ$ .

Висота соплової лопатки першої ступені

$$l_{c1} = \frac{F_{3c}}{\pi \cdot D_{c3}} = 0,067 \text{ м.}$$

Висота робочої лопатки першої ступені

$$l_{p1} = 1,05 \cdot l_{c1} = 0,07 \text{ м.}$$

Відносна висота лопатки

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 35   |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |                        |  |  |  |  |      |



$$\lambda_{c_{a4}} = \frac{c_{a4}}{\sqrt{2 \cdot \frac{\kappa_{r4}}{\kappa_{r4} + 1} \cdot T_4 \cdot R_r}} = 0,3099$$

Газодинамічна функція

$$q(\lambda_{c_{a4}}) = \lambda_{c_{a4}} \cdot \left[ \frac{\kappa_{r4} + 1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\kappa_{r4} - 1}{\kappa_{r4} + 1} \cdot \lambda_{c_{a4}}^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa_{r4} - 1}} = 0,4728$$

Величина кільцевої площі вхідного перетину

$$F_4 = \frac{G_t \cdot \sqrt{T_4}}{\sqrt{\frac{\kappa_{r4}}{R_r} \cdot \left( \frac{2}{\kappa_{r4} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{r4} + 1}{\kappa_{r4} - 1}} \cdot P_4 \cdot q(\lambda_{c_{a4}})}} = 2,507 \text{ м}^2$$

Запас міцності робочої лопатки ступені

$$K_{np4} = \frac{\sigma_{4\tau}^{T_{m4}}}{9,8 \cdot \left( \frac{\rho_{m4}}{7850} \right) \cdot n_T^2 \cdot F_4} = 1,8$$

де  $\sigma_{4\tau}^{T_{m4}} = 400 \text{ МПа}$ .

Геометричні характеристики вихідного перетину турбіни

$$D_c = const;$$

$$D_{c4} = D_{c3} = 1,796;$$

$$D_{в4} = D_{c4} - \frac{F_4}{\pi \cdot D_{c4}} = 1,351 \text{ м};$$

$$D_{п4} = D_{c4} + \frac{F_4}{\pi \cdot D_{c4}} = 2,241 \text{ м}.$$

Висота робочої лопатки останнього ступеня

$$l_{p4} = \frac{D_{п4} - D_{в4}}{2} = 0,445 \text{ м}.$$

Відносна висота лопатки

$$g_{i4} = \frac{D_{c4}}{l_{p4}} = 4,04 > 3,5.$$

### 1.5.3.3 Осьовий габарит проточної частини турбін

Середня кільцева площа

$$F_{ст} = \frac{F_{3c} + F_4}{2} = 1,442 \text{ м}^2.$$

|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
|---------------|------|--------------|--------|--------------|------------------------|---------------|--|--------------|------|
| Підпис і дата |      | Інв. № дубл. |        | Взам. інв. № |                        | Підпис і дата |  | Інв. № подл. |      |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
| Зм.           | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата         | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. |               |  |              | Арк. |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              | 37   |

Розмір середньої ступені

$$D_{cc} = 1,796 \text{ м};$$

$$D_{bc} = D_{cc} - \frac{F_{ct}}{\pi \cdot D_{cc}} = 1,540 \text{ м};$$

$$D_{hc} = D_{cc} + \frac{F_{ct}}{\pi \cdot D_{cc}} = 2,052 \text{ м};$$

$$l_{pc} = \frac{D_{hc} - D_{bc}}{2} = 0,256 \text{ м}.$$

Відносна висота лопатки

$$g_{ct} = \frac{D_{cc}}{l_{pc}} = 4,04 > 3,5.$$

Відносна ширина рішети компресорної лопатки та відносний осьовий зазор

$$\left(\frac{b}{l}\right); \left(\frac{\delta}{l}\right) = A_0 + A_1 \cdot g_{ct} + A_2 \cdot g_{ct}^2 + A_3 \cdot g_{ct}^3$$

Таблиця 1.8

| Параметр                          | Інтервал     | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | Розрахунок |
|-----------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| $\left(\frac{b}{l}\right)_p$      | 0,16...1,0   | 0,06934        | 0,02633        | 0,00186        | -0,00003       | 0,2041     |
| $\left(\frac{b}{l}\right)_h$      | 0,15...0,67  | 0,08722        | 0,02096        | 0,00077        | -0,00001       | 0,1838     |
| $\left(\frac{\delta}{l}\right)_p$ | 0,065...0,3  | 0,04700        | 0,00329        | 0,00074        | -0,00001       | 0,0717     |
| $\left(\frac{\delta}{l}\right)_h$ | 0,055...0,21 | 0,02708        | 0,00841        | -0,00006       | 0,00001        | 0,0607     |

Осьовий габарит ступеня

$$L_{ct.T} = l_{pc} \cdot \left[ \left(\frac{b}{l}\right)_c + \left(\frac{\delta}{l}\right)_c + \left(\frac{b}{l}\right)_p + \left(\frac{\delta}{l}\right)_p \right] = 0,133 \text{ м}.$$

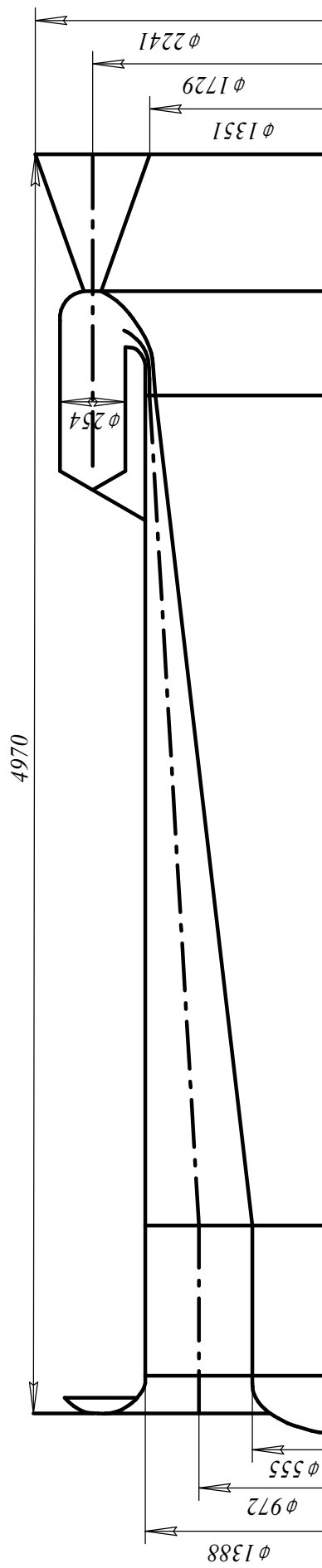
Довжина турбіни

$$L_T = L_{ct.T} \cdot z_T = 0,532 \text{ м}.$$

|               |              |              |               |              |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 38   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

КР.14.2.6231М.03.01.ПЗ.



|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инд. № подл. | Подп. и дата | Взам. инд. № | Инд. № дудл. | Подп. и дата |
|              |              |              |              |              |
| Изм.         | Лист         | № докум.     | Подп.        | Дата         |

КР.14.2.6231М.03.01.ПЗ.

Лист

39

Копирован

Формат А4

## 1.6 Термодинамічні розрахунки турбіни

Відомо, що параметри робочого середовища в газових турбінах змінюються не тільки вздовж проточної частини, але й в різних точках будь-якого поперечного перерізу через складну форму лопаткових апаратів, наявність тертя та пограничного шару. В загальному випадку потік в осевій газовій турбіні є тривимірним і нестационарним.

Метою проектування турбін є отримання обмеженого числа інтегральних газодинамічних, конструктивних та експлуатаційних параметрів, які забезпечують задану в розрахунках циклу ГТА ефективність проточних частин турбін, виражену величиною їх внутрішнього ККД.

Це дозволяє при проектуванні турбін проводити значно спрощені розрахунки з використанням значень параметрів робочого тіла, усереднених за вибраним перерізом каналу. При усередненні реальний нерівномірний потік замінюється відповідним канонічним потоком, який характеризується найменшим числом параметрів, при котрих ще зберігаються властивості реального потоку, істотні для оцінки процесів. Важливо, щоб в отриманій в результаті проектування турбіні реалізувався потік, близький до канонічного, тобто геометричні та кінематичні характеристики спроектованої турбіни забезпечували виконання тих допущень, які були прийняті при усередненні реального потоку.

Проектні розрахунки турбін передбачають визначення геометричних параметрів проточних частин, які забезпечують максимальне значення їх ККД при відомих з розрахунку циклу початкових і кінцевих параметрах робочого тіла. Ці розрахунки, як правило, виконують на базі одновимірної моделі течії робочого тіла. При проектуванні проточних частин нових типів на стадії проектних розрахунків можливе використання і сучасних моделей просторового потоку.

Перевірні розрахунки мають метою перевірку умов течії робочого тіла в проточній частині, отриманій в проектному розрахунку, та їх коригування з урахуванням зміни параметрів у просторі. Ці розрахунки виконують на базі дво і тривимірних математичних моделей.

|               |      |          |        |      |                        |      |
|---------------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                        |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                        |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                        |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                        |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|               |      |          |        |      |                        | 40   |
|               |      |          |        |      |                        |      |

Програма "GTA5OT" призначена для виконання термогазодинамічного розрахунку проточної частини осьової газової турбіни суднового або енергетичного ГТД. Математична модель й алгоритм програми розроблені з використанням методики розрахунку осьової газової турбіни.

Запуск програми виконується файлом gta5ot.exe, розміщеним у директорії SAPRTA.

Вихідні дані для розрахунку варіанта готуються студентом шляхом редагування файлу isgta5ot.dat, котрий знаходиться в директорії GRUP5.

Результати розрахунку варіанта турбіни видаються на друкуючий прилад у табличній формі по ступеням.

Повна роздруківка вихідних даних й результатів розрахунку заданого варіанта знаходиться в файлі rzgta5ot.dat, розміщеного в директорії GRUP5.

При проектуванні ГТД висуваються високі вимоги до ефективності проточних частин осьових турбін. Це пояснюється тим, що зниження ККД турбін при невірному виборі параметрів для їх проточних частин призводить до зниження показників всього ГТД в результаті відхилення параметрів від розрахункових і, значить, зростання гідравлічних втрат.

Термогазодинамічний розрахунок проточних частин осьових турбін проводяться з метою визначення геометричних параметрів проточних частин (геометричні параметри вінців, трикутники швидкостей). Розрахунок ведеться на основі детального теплового розрахунку на режимі повної потужності та габаритно - компоновочного розрахунку двигуна.

За результатами розрахунку будуються профілі соплових та робочих лопаток на середньому діаметрі кожного ступеня турбіни (рис.1.6).

Термогазодинамічний розрахунок осьової газової турбіни енергетичного ГТД проведено за допомогою програми "GTA5OT". Розшифровка ідентифікаторів вхідних і вихідних даних приведена в табл. 1.9

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|--------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--|--|--|------------------------|------|--|--|--|--|--|----|-----|------|----------|--------|------|--|
| Інв. № подл.                                                                                                                                                                                                                                                                           | Підпис і дата |          |        |      | всього ГТД в результаті відхилення параметрів від розрахункових і, значить, зростання гідравлічних втрат.<br><br>Термогазодинамічний розрахунок проточних частин осьових турбін проводяться з метою визначення геометричних параметрів проточних частин (геометричні параметри вінців, трикутники швидкостей). Розрахунок ведеться на основі деталь-ного теплового розрахунку на режимі повної потужності та габаритно - компоново-чного розрахунку двигуна.<br><br>За результатами розрахунку будуються профілі соплових та робочих лопаток на середньому діаметрі кожного ступеня турбіни (рис.1.6).<br><br>Термогазодинамічний розрахунок осьової газової турбіни енергетичного ГТД проведено за допомогою програми "GTA5OT". Розшифровка ідентифікаторів вхід-них і вихідних даних приведена в табл. 1.9 |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Інв. № дубл.  |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Взам. інв. №  |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Підпис і дата |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
| <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3">КР.142.6231м.03.01.ПЗ.</td><td>Арк.</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>41</td></tr><tr><td>Зм.</td><td>Арк.</td><td>№ докум.</td><td>Підпис</td><td>Дата</td><td></td></tr></table> |               |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |  |  |  |  |  | 41 | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Арк. |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |          |        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 41   |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |
| Зм.                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |  |  |  |                        |      |  |  |  |  |  |    |     |      |          |        |      |  |



Таблиця 1.9 - Розшифровка ідентифікаторів вхідних і вихідних даних

| Іденти-<br>фікатор | Найменування параметра                                                     | Розмірність |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| XC                 | Кількість охолоджуваних соплових вінців                                    |             |
| XR                 | Кількість охолоджуваних робочих вінців                                     |             |
| Z                  | Кількість ступенів турбіни                                                 |             |
| AOI                | Кут входу потоку на соплові лопатки 1-ї ступені                            | Град.       |
| AI                 | Кут виходу потоку із сопел 1-ї ступені                                     | Град.       |
| CP                 | Середня питома теплоємність газу в турбіні                                 | кДж/(кг·К)  |
| D11                | Середній діаметр на виході із соплового апарата 1-ї ступені                | М           |
| GAK                | Кореневе значення кута розкриття проточної частини біля кореня лопаток     | Град        |
| GAP                | Периферійне значення кута розкриття проточної частини на периферії лопаток | Град        |
| GH                 | Витрата газу на вході в турбіну                                            | кг/с        |
| NT                 | Необхідне значення частоти обертання вала                                  | об/хв.      |
| PO3                | Повний тиск газу на вході в турбіну                                        | МПа         |
| P23                | Повний тиск газу на виході з турбіни                                       | МПа         |
| R                  | Газова постійна робочого тіла                                              | кДж/(кгК)   |
| TO3                | Температура загальмованого потоку на вході                                 | К           |
| T23                | Температура загальмованого потоку на виході                                | К           |
| TBV                | Температура охолодного повітря на вході в охолоджувані лопатки             | К           |
| UM                 | Механічний ККД турбіни                                                     |             |
| A(Z)               | Значення коефіцієнта А по ступенях                                         |             |
| DR(Z)              | Відносний радіальний зазор між робочими лопатками і корпусом турбіни       | Град.       |
| GEC(Z)             | Коефіцієнт ефективності охолодження соплових лопаток                       |             |
| GER(Z)             | Коефіцієнт ефективності охолодження робочих лопаток                        |             |
| PCI(Z)             | Швидкісний коефіцієнт соплових решіток                                     |             |
| PFI(Z)             | Швидкісний коефіцієнт робочих решіток                                      |             |
| ROK(Z)             | Ступінь реактивності ступеня в кореня                                      |             |
| TC(Z)              | Відносний крок лопаток у соплових решітках                                 |             |
| TDC(Z)             | Припустима температура металу соплових лопаток                             | К           |
| TDP(Z)             | Припустима температура металу робочих лопаток                              | К           |
| A1                 | Кут виходу потоку із соплових решіток                                      | Град.       |
| A2                 | Кут виходу потоку зі ступеня у відносному русі                             | Град.       |
| AUI                | Кут установки соплових лопаток у решітках                                  | Град.       |
| B1                 | Кут виходу потоку на робочі лопатки у відносному русі                      | Град.       |
| B2                 | Кут виходу потоку газу з робочих лопаток у відносному русі                 | Град.       |
| BCI                | Осьова ширина соплових решіток                                             | м           |
| BPI                | Осьова ширина робочих решіток                                              | м           |

|              |               |              |              |               |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |              |              |               |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 42   |

Продовж. табл. 1.9

| Іденти-фікатор | Найменування параметра                                         | Розмірність |
|----------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| BUI            | Кут установки робочих лопаток у решітках                       | Град.       |
| C1             | Дійсна швидкість виходу потоку із сопів                        | м/с         |
| C2             | Абсолютна швидкість виходу потоку з робочих решіток            | м/с         |
| DC0            | Середній діаметр на вході в ступень                            | м           |
| DC1            | Середній діаметр на виході із сопел                            | м           |
| DC2            | Середній діаметр на виході з робочих решіток                   | м           |
| EI             | Внутрішній ККД ступені                                         |             |
| EU             | Окружний ККД ступені                                           |             |
| GOXC           | Витрата повітря на охолодження соплових решіток                | кг/с        |
| GOXP           | Витрата повітря на охолодження робочих решіток                 | кг/с        |
| HAD            | Температурний перепад, що відпрацьовується в ступені           | кДж/кг      |
| HVD            | Дійсна характеристика U1/C1 ступені                            |             |
| HVOP           | Оптимальне значення характеристики U1/C1 для ступені           |             |
| LAMC1          | Газодинамічна функція                                          |             |
| LCI            | Висота соплових решіток                                        | м           |
| LPI            | Висота робочих решіток                                         | м           |
| N1             | Внутрішня потужність ступені                                   | кВт         |
| P0             | Тиск загальмованого потоку перед ступенем                      | МПа         |
| PI             | Статичний тиск у потоці на виході із сопел                     | МПа         |
| P2             | Статичний тиск у потоці за ступенем                            | МПа         |
| P23            | Тиск загальмованого потоку за ступенем                         | МПа         |
| SCI            | Осьовий зазор за сопловими решітками                           | м           |
| SPI            | Осьовий зазор за робочими решітками                            | м           |
| T0             | Температура гальмування потоку перед ступенем                  | К           |
| T1             | Статична температура потоку на виході із сопел                 | К           |
| T2             | Статична температура потоку за ступенем                        | К           |
| T23            | Температура гальмування потоку за ступенем                     | К           |
| TCI            | Крок соплових решіток                                          | м           |
| TPI            | Крок робочих решіток                                           | м           |
| U1             | Окружна швидкість на середньому діаметрі за соплами            | м/с         |
| U2             | Окружна швидкість на середньому діаметрі за робочими решітками | м/с         |
| W1             | Відносна швидкість входу потоку на робочі лопатки              | м/с         |
| W2             | Швидкість потоку на виході з робочих ґрат у відносному русі    | м/с         |
| ZC             | Число лопаток соплових решіток                                 |             |
| ZP             | Число лопаток робочих решіток                                  |             |

|              |               |              |              |               |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |              |              |               |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 43   |

Таблица 1.10 – Термогазодинамичний розрахунок осевої турбіни

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСЕВОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

студент: гр.6231м Костріков В.А.

Расчет: Турбина ГТД Ne=60000 кВт

| Z        | XC       | XR     | GH      | NT     | D11    |
|----------|----------|--------|---------|--------|--------|
|          |          |        | кг/с    | об/мин | м      |
| 4        | 1        | 1      | 170.725 | 3000.0 | 1.7960 |
| P03      | T03      | P23    | T23     | TB0    | UM     |
| МПа      | К        | МПа    | К       | К      |        |
| 1.8862   | 1500.0   | 0.1028 | 794.4   | 705.0  | 0.900  |
| CP       | R        | A0I    | A1I     | GAK    | GAP    |
| КДж/кг/К | КДж/кг/К | град   | град    | град   | град   |
| 1.2099   | 0.288    | 90.00  | 16.00   | 0.00   | 17.00  |

|        | ИСХОДНЫЕ |        |        | ДАННЫЕ | ПО    | СТУПЕНЯМ |
|--------|----------|--------|--------|--------|-------|----------|
|        | 1ст      | 2ст    | 3ст    | 4ст    | 5ст   | 6ст.     |
| A(Z)   | 1.00     | 1.02   | 1.02   | 0.96   | 0.00  | 0.00     |
| FI(Z)  | 0.980    | 0.980  | 0.980  | 0.980  | 0.000 | 0.000    |
| PCI(Z) | 0.970    | 0.970  | 0.970  | 0.970  | 0.000 | 0.000    |
| TC(Z)  | 0.750    | 0.750  | 0.750  | 0.750  | 0.000 | 0.000    |
| ROK(Z) | 0.113    | 0.050  | 0.050  | 0.050  | 0.000 | 0.000    |
| DR(Z)  | 0.004    | 0.004  | 0.004  | 0.004  | 0.000 | 0.000    |
| TDC(Z) | 1080.0   | 1080.0 | 1080.0 | 1080.0 | 0.0   | 0.0      |
| TDP(Z) | 1080.0   | 1080.0 | 1080.0 | 1080.0 | 0.0   | 0.0      |
| GEC(Z) | 0.022    | 0.022  | 0.022  | 0.022  | 0.000 | 0.000    |
| GER(Z) | 0.022    | 0.022  | 0.022  | 0.022  | 0.000 | 0.000    |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТУРБИНЫ

|                                                           |           |        |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------|
| 1.ИЗОЭНТРОПИЙНЫЙ ТЕПЛОПЕРАПАД ПО ПОЛНЫМ ПАРАМЕТРАМ,КДЖ/КТ | 906.91    |        |
| 2.РАСПОЛАГАЕМЫЙ ТЕПЛОПЕРЕПАД,КДЖ/КТ                       | 957.74    |        |
| 3.ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ТУРБИНЫ,КВТ                        | 124424.00 |        |
| 4.ВНУТРЕННИЙ КПД ПО ЗАТОРМОЖЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ              |           | 0.8455 |
| 5.РАСЧЕТНАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ,ОБ/МИН                       | 3000.0    |        |

ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА ПО СТУПЕНЯМ

|         | 1ст    | 2ст    | 3ст    | 4ст    | 5ст    | 6ст    |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T0,К    | 1500.0 | 1284.4 | 1112.7 | 950.2  | 0.0    | 0.0    |
| P0,МПа  | 1.8862 | 1.0708 | 0.5462 | 0.2446 | 0.0000 | 0.0000 |
| T1,К    | 1304.5 | 1117.9 | 954.2  | 787.1  | 0.0    | 0.0    |
| P1,МПа  | 1.1678 | 0.5822 | 0.2782 | 0.1070 | 0.0000 | 0.0000 |
| T2,К    | 1275.8 | 1096.3 | 925.5  | 746.7  | 0.0    | 0.0    |
| P2,МПа  | 1.0410 | 0.5130 | 0.2189 | 0.0807 | 0.0000 | 0.0000 |
| T23,К   | 1284.4 | 1112.7 | 950.2  | 795.5  | 0.0    | 0.0    |
| P23,МПа | 1.0708 | 0.5462 | 0.2446 | 0.1028 | 0.0000 | 0.0000 |

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЕЙ,РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

|            |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| HAD,кДж/кг | 239.44 | 244.22 | 244.22 | 266.74 | 0.00   | 0.00   |
| LAMC1      | 0.8756 | 0.9797 | 1.0269 | 1.1272 | 0.0000 | 0.0000 |
| HVD        | 0.5879 | 0.5744 | 0.6034 | 0.6175 | 0.0000 | 0.0000 |
| HVOP       | 0.5879 | 0.5428 | 0.5577 | 0.5499 | 0.0000 | 0.0000 |
| GOXC,кг/с  | 9.73   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| GOXP,кг/с  | 10.14  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| ROM        | 0.1825 | 0.1409 | 0.1823 | 0.2296 | 0.0000 | 0.0000 |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.01.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 44   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

Продовж. табл. 1.10

## ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕУГОЛЬНИКОВ СКОРОСТЕЙ

|         |       |       |       |       |      |      |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| A1,ГРАД | 16.00 | 21.15 | 24.21 | 32.10 | 0.00 | 0.00 |
| C1,М/С  | 596.4 | 634.8 | 619.3 | 628.3 | 0.0  | 0.0  |
| B1,ГРАД | 37.69 | 45.21 | 53.04 | 66.62 | 0.00 | 0.00 |
| W1,М/С  | 268.9 | 322.8 | 317.9 | 363.7 | 0.0  | 0.0  |
| U1,М/С  | 360.5 | 364.7 | 373.7 | 388.0 | 0.0  | 0.0  |
| B2,ГРАД | 21.39 | 29.52 | 34.97 | 44.13 | 0.00 | 0.00 |
| W2,М/С  | 395.1 | 403.5 | 422.9 | 489.6 | 0.0  | 0.0  |
| A2,ГРАД | 88.28 | 95.12 | 97.93 | 97.44 | 0.00 | 0.00 |
| C2,М/С  | 144.2 | 199.6 | 244.8 | 343.8 | 0.0  | 0.0  |
| U2,М/С  | 363.6 | 368.9 | 380.4 | 395.9 | 0.0  | 0.0  |

# ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ РЕШЕТОК

|          |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| DC0,M    | 1.7960 | 1.7960 | 1.7960 | 1.7960 | 0.0000 | 0.0000 |
| DC1,M    | 1.7960 | 1.8168 | 1.8618 | 1.9328 | 0.0000 | 0.0000 |
| BC1,M    | 0.0416 | 0.0564 | 0.0887 | 0.1033 | 0.0000 | 0.0000 |
| LC1,M    | 0.0594 | 0.0806 | 0.1267 | 0.1993 | 0.0000 | 0.0000 |
| SC1,M    | 0.0178 | 0.0242 | 0.0380 | 0.0445 | 0.0000 | 0.0000 |
| AUI,ГРАД | 36.04  | 39.13  | 38.55  | 38.63  | 0.00   | 0.00   |
| TC1,M    | 0.0527 | 0.0671 | 0.1063 | 0.1239 | 0.0000 | 0.0000 |
| BPI,M    | 0.0374 | 0.0508 | 0.0803 | 0.0975 | 0.0000 | 0.0000 |
| LPI,M    | 0.0752 | 0.1021 | 0.1605 | 0.2400 | 0.0000 | 0.0000 |
| DC2,M    | 1.8114 | 1.8377 | 1.8949 | 1.9726 | 0.0000 | 0.0000 |
| SPI,M    | 0.0142 | 0.0193 | 0.0304 | 0.0356 | 0.0000 | 0.0000 |
| BUI,ГРАД | 66.61  | 66.28  | 64.84  | 62.23  | 0.00   | 0.00   |
| TPI,M    | 0.0295 | 0.0365 | 0.0595 | 0.0765 | 0.0000 | 0.0000 |
| ZC       | 107    | 85     | 55     | 49     | 0      | 0      |
| ZP       | 193    | 158    | 100    | 81     | 0      | 0      |

## ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЕЙ

|       |         |         |         |         |        |        |
|-------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| EU    | 0.8235  | 0.8571  | 0.8117  | 0.7080  | 0.0000 | 0.0000 |
| EI    | 0.8164  | 0.8505  | 0.8051  | 0.7018  | 0.0000 | 0.0000 |
| NLKBT | 33531.3 | 31914.9 | 30212.1 | 28764.0 | 0.0    | 0.0    |

|              |               |              |              |               |                                                                        |  |  |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Подпис і дата | ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЕЙ                                       |  |  |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               | EU            0.8235    0.8571    0.8117    0.7080    0.0000    0.0000 |  |  |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               | EI            0.8164    0.8505    0.8051    0.7018    0.0000    0.0000 |  |  |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               | NI,KBT 33531.3    31914.9    30212.1    28764.0    0.0            0.0  |  |  |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.01.ПЗ.                                                 |  |  |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                                                                        |  |  |  |  |  |  | 45   |
|              |               |              |              |               |                                                                        |  |  |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                                                                        |  |  |  |  |  |  |      |

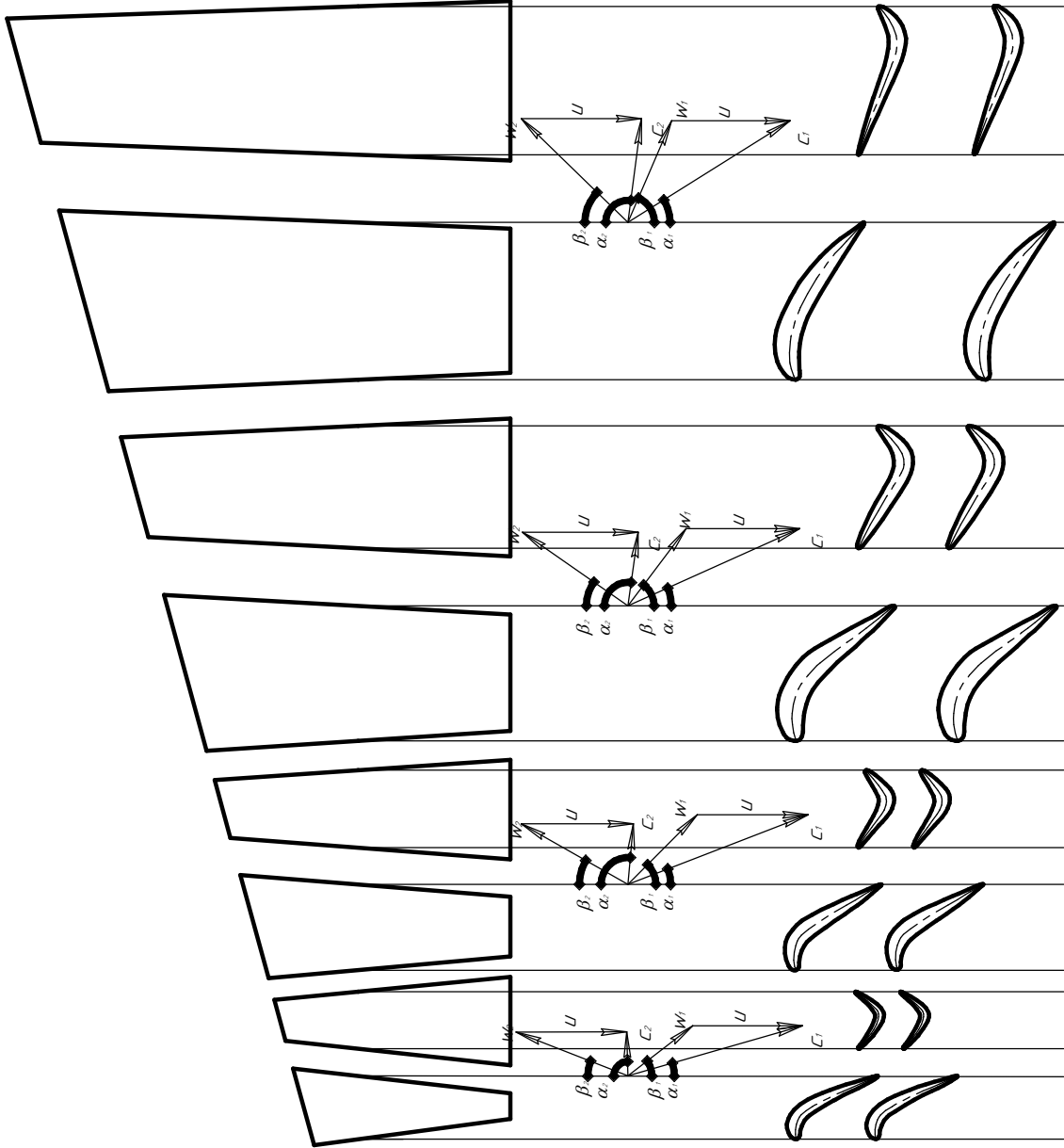


Рисунок 1.17 - Ескіз проточної частини ТГ

|               |               |                  |          |        |      |                                          |              |               |         |
|---------------|---------------|------------------|----------|--------|------|------------------------------------------|--------------|---------------|---------|
| Інв. № подл.  | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. №                             | Інв. № дубл. | Підпис і дата |         |
|               |               |                  |          |        |      |                                          |              |               |         |
| Інв. № докум. |               |                  |          |        |      | КР.142.6231м.03.02.ПЗ.                   |              |               |         |
|               |               |                  |          |        |      |                                          |              |               |         |
|               | Зм.           | Арк.             | № докум. | Підпис | Дата | Конструктивні розрахунки і конструювання | Літ.         | Арк.          | Аркушів |
|               | Студент.      | Костріков В.А.   |          |        |      |                                          |              |               |         |
|               | Керівник      | Козловський А.В. |          |        |      |                                          |              | 47            | 72      |
|               | Консульт.     |                  |          |        |      |                                          | НУК          |               |         |
|               | Зав.кафедр    | Патлайчук В.М.   |          |        |      |                                          |              |               |         |
|               |               |                  |          |        |      |                                          |              |               |         |



Передня опора складається з двох підшипників ковзання – опорного і упорного. Опорний підшипник ковзання складається з корпусу і п'яти самоустановлювальних сегментів. Сегменти на поверхні, що стикається з передньою цапфою ротора, мають антифрикційний шар. З азотованою поверхнею корпусу опори контактує криволінійна поверхня сегментів, що дозволяє їм самовстановлюватися щодо цапфи ротора.

Упорний підшипник ковзання – двосторонній, складається з 28 колодок і завзятого гребеня. Колодки розташовані по 14 штук з кожної сторони гребеня і з боку гребеня мають антифрикційний шар, із протилежної ж сторони в них уставлений сферичний упор з азотованої сталі, що спирається на пружні пластини. Сферичні упори дозволяють колодкам самовстановлюватися щодо завзятого гребеня, а пружні пластини, що прогинаються під дією осьової сили, компенсують перекис завзятого гребеня. Змащення й охолодження деталей підшипника здійснюється струминною подачею олії з форсунок, установлених між колодками, і з отворів, що повідомляють масляні канали корпусу підшипника з його внутрішньою порожниною.

Корпус 1-5-го ступенів компресора 3 призначений для розміщення п'яти направляючих апаратів. Над робочими лопатками 1-го і 2-го ступенів організовані антизривні пристрої, виконані в корпусі компресора у виді кільцевих камер, у які повітря попадає через щілинні кільця.

Направляючі апарати виконані у виді зовнішнього і внутрішнього півкільця, з'єднаних між собою направляючими лопатками. Кожна лопатка в зовнішнє кільце установлюється хвостовиком типу "ласточкин хвіст", у внутрішнє кільце – призматичним хвостовиком. В внутрішніх кільцях лопатки фіксуються штифтовкой.

Корпус компресора – зварений, складається з двох половин з горизонтальним розніманням. За направляючим апаратом 5-го ступеня організований добір повітря при запуску ГТД. Корпус 6-14-й ступенів 6 містить у собі направляючі апарати 6-14-го ступенів. По своїй конструкції і матеріалові корпус і направляючі апарати аналогічні корпусові компресора і напрямним апаратам 1-5-го ступенів.

На корпусі 6 виконані добори повітря за 8-м ступенем на охолодження корпусів і соплових лопаток турбіни і добір повітря за 10-м ступенем, з якого через

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 49   |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  |      |



п'ять клапанів 5 здійснюється перепуск повітря в атмосферу для забезпечення усталеної роботи двигуна при запуску. Через 10-й ступінь через антиобledenілий клапан також виробляється добір повітря на антиобledenілу систему.

Ротор компресора – дисково-барабанної конструкції, складається з трьох на- чіпних дисків (1-3-і ступені), диска-цапфи 4-го ступеня, двох барабанів (5-10-й ступенів і 11-15-го ступенів), робочих лопаток.

Барабани з'єднані між собою і диском-цапфою за допомогою штифтів. Начіпні диски з'єднані між собою через лабіринтові втулки стяжними болтами. Робочі ло- патки встановлені в пазах дисків замковою частиною типу "ласточкин хвіст". Осьова фіксація лопаток здійснюється пластинчастими замками.

За 7-м і 10-м ступеннями за допомогою радіально встановлених труб організо- вані добори повітря в порожнину ротора. Добір за 7-м ступенем призначений для охолодження дисків компресора, а за 10-й – для охолодження ротора турбіни.

На 17-м диску компресора встановлений двухпоясний розвантажувальний лабіринт. На цьому ж диску мається фланець для з'єднання ротора компресора з ротором турбіни за допомогою призонних болтів.

### Опис камери згоряння

Камера згоряння (рис. 2.2) – протитокова, трубчасто-кільцевого типу, має двадцять жарових труб, що забезпечують роботу на двох видах палива – газоподіб- ному і рідкому.

Жарові труби 4 складаються з двох частин: кільцевої головної частини й ос- новної труби. Дві частини жарової труби утворюють дві зони горіння при роботі дви- гуна. Кожна кільцева частина має фронтову дошку з вісьма осерадіальними завих- рювачами з передкамерою. Внутрішня стінка кільцевої частини виконана у виді циліндра із системою конвективно-загороджувального охолодження. Зовнішня сті- нка кільцевої частини й основної труби виготовлена двошарової, "черепичного" типу із системою конвективно-загороджувального охолодження.

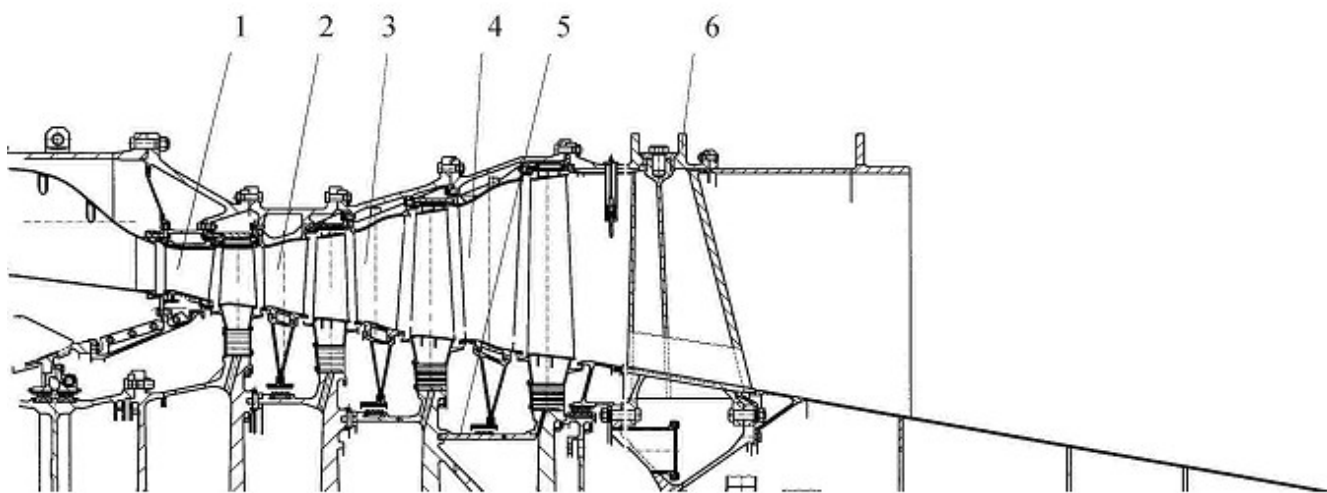
Зовнішня стінка жарової труби складається з трьох сегментних частин, з'єд- наних у циліндр. Кожен сегмент стінки складений з набору сегментних уставок, за- кріплених на зовнішньому корпусі за допомогою зачепів і фіксуючихся заклепок.

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  | Арк.<br>50 |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |                        |  |  |  |  |            |



Кожух 3 обмежує кільцевий канал камери згоряння по зовнішньому діаметрі і є елементом силової схеми двигуна. На ньому маються місця для установки запальників. Кожух складається з двох частин і має горизонтальне рознімання, що складається з фланцевого з'єднання і стяжної планки.

Турбіна двигуна (рис. 2.3) – осьова, чотирьохступінчата, складається із соплових апаратів зі своїми зовнішніми корпусами, ротора 5, опорного вінця 6. Корпус турбіни має тільки вертикальні рознімання, корпус соплового апарата 2-го ступеня має горизонтальне рознімання, що забезпечує можливість демонтажу і заміни робочих лопаток 1-го і 2-го ступенів і соплових лопаток 2-го ступеня без розбирання інших корпусів двигуна.



1 – сопловий апарат 1-го ступеня; 2 – сопловий апарат 2-го ступеня; 3 – сопловий апарат 3-го ступеня; 4 – сопловий апарат 4-го ступеня; 5 – ротор турбіни; 6 – опорний вінець

Соплові апарати 1-3-го ступенів і робітники лопатки 1-го і 2-го ступенів – охолоджувані. Сопловий апарат 1-го ступеня має конвективно - плівкове охолодження вторинним повітрям. Охолодження соплових апаратів 2-го і 3-го ступенів – конвективне, кондиційованим повітрям, відібраним за компресором.

Ротор турбіни, з'єднаний з ротором компресора болтовим з'єднанням, складає одне ціле – ротор двигуна.

Диски перших трьох ступенів турбіни з'єднані електронно-променевим зварюванням. Диск 4-го ступеня через конічну спідницю приєднаний болтами. Ротор через цапфу, що кріпиться до диска 4-го ступеня болтами, і втулку спирається через колодки опорного підшипника на статор. На роторі з боку диска 4-го ступеня навішений диск, що несе лабіринтові вставки для організації розвантажувальної порожнини. З боку диска 1-го ступеня на ротор навішений проміжний диск, що забезпечує підведення охолодного повітря і несе частину барабана ротора. Усередині ротора закріплені кожухи, що забезпечують підведення охолодного повітря до робочих лопаток і дисків.

Робочі лопатки 1-го ступеня – литі, з конвективним охолодженням, без бандажної полиці. Робочі лопатки інших ступенів обандажені.

В опорному вінці турбіни розміщений опорний підшипник ковзання, що складає з п'яти самоустановлювальних колодок. Підведення олії здійснюється розбризкуванням через жиклери кільця-колектора на цапфу ротора.

Внутрішній корпус опорного вінця з'єднується з зовнішнім корпусом дванадцятьма стійками, що проходять через проточну частину турбіни.

У зовнішньому корпусі опорного вінця встановлені двадцять патрубків для розміщення термопар виміру температури газу на виході з турбіни. У районі горизонтальної площини розташовані дві опори для установки двигуна на раму. У конструкції опор передбачені цапфи для підйому двигуна краном.

Кріплення двигуна до рами здійснюється однієї передньої і двома задніми опорами. Передня опора нерухома і являє собою твердий лист із ребрами, що кріпиться до фланця переднього корпуса компресора і до тумби рами. Задні опори кріпляться до цапфи опорного вінця турбіни і складаються з гнучких аркушів, встановлених у два яруси у взаємно перпендикулярних площинах.

## 2.2 Розрахунок закручення робочої лопатки 4-го ступеня турбіни

В газотурбобудуванні частіше використовують метод закручення лопаток за законом сталості циркуляції. При використанні цього методу вважають, що повні

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  | 53   |

параметри потоку на вході в ступень і швидкісні коефіцієнти  $\psi$  і  $\varphi$  незмінні за радіусом.

У даному випадку як додаткову умову при інтегруванні рівняння радіальної рівноваги газу беруть  $C_{1a} = \text{const}$ , що відповідає рівномірному полю осьових швидкостей у зазорі між сопловими і робочими лопатками.

Характерною рисою даного виду закручення є те, що відношення  $U/C_1$  в будь-якому перерізі лопаток залишається оптимальним, коли воно обране найвигоднішим в одному перерізі, оскільки збільшення  $U/C_1$  зі зростанням радіусу відповідає підвищенню міри реактивності. Насправді при  $C_{2ucp} = 0$  закручення потоку за робочим колесом відсутнє по всій довжині лопатки.

При закрученні лопаток за законом сталості циркуляції густина і тиск робочого тіла в міжвінцевому зазорі, а також реактивність ступеня інтенсивно зростають від кореня до периферії. Збільшуються від кореня до периферії вихідний кут соплових лопаток  $\alpha_1$  геом і вхідний кут робочих лопаток  $\beta_1$  геом., причому  $\alpha_1$  може зростати в 1,3...2 рази, а  $\beta_1$  - у 4...6 разів. Кут  $\beta_2$  геом. зменшується до периферії на кілька градусів. Розрахунок виконаний за методом, який описано в табл. 2.1 для трьох контрольних перерізів за вхідними даними:

$$D_{cp} = 1,796 \text{ м}; l_p = 0,07 \text{ м}; u_{2cp} = 395,9 \text{ м/с}; \alpha_{1cp} = 32,1^\circ; c_{1cp} = 628,3 \text{ м/с}; (u/c_1)_{cp} = 0,618, \\ \alpha_{2cp} = 97,44^\circ; c_{2cp} = 343,8 \text{ м/с}; \beta_{2cp} = 44,13^\circ; w_{2cp} = 489,6 \text{ м/с}; \varphi = 0,98; \psi = 0,97.$$

Таблиця 2.1 - Розрахунок закручення робочої лопатки 4-го ступеня турбіни

| Найменування параметра       | Спосіб визначення                        | Характерні перерізи |                        |              |
|------------------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|
|                              |                                          | Біля кореня         | На середньому діаметрі | На периферії |
| 1                            | 2                                        | 3                   | 4                      | 5            |
| 1.Радіус перерізу $r$ , м    | За відомими значеннями $D_{cp2}$ і $l_p$ | 0,863               | 0,898                  | 0,933        |
| 2.Відносний радіус $\bar{r}$ | $\frac{2r}{D_{cp2}}$                     | 0,961               | 1                      | 1,039        |
| 3.Колова швидкість $u$ , м/с | $u_{2cp} \bar{r}$                        | 380,5               | 395,9                  | 411,3        |

|                                                                                                                           |                                   |          |        |      |  |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------|--------|------|--|------|
| <div>Підпис і дата</div> <div>Інв. № дубл.</div> <div>Взам. інв. №</div> <div>Підпис і дата</div> <div>Інв. № подл.</div> |                                   |          |        |      |  | Арк. |
|                                                                                                                           |                                   |          |        |      |  | 54   |
|                                                                                                                           | <div>КР.142.6231м.03.02.ПЗ.</div> |          |        |      |  |      |
|                                                                                                                           |                                   |          |        |      |  |      |
| Зм.                                                                                                                       | Арк.                              | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

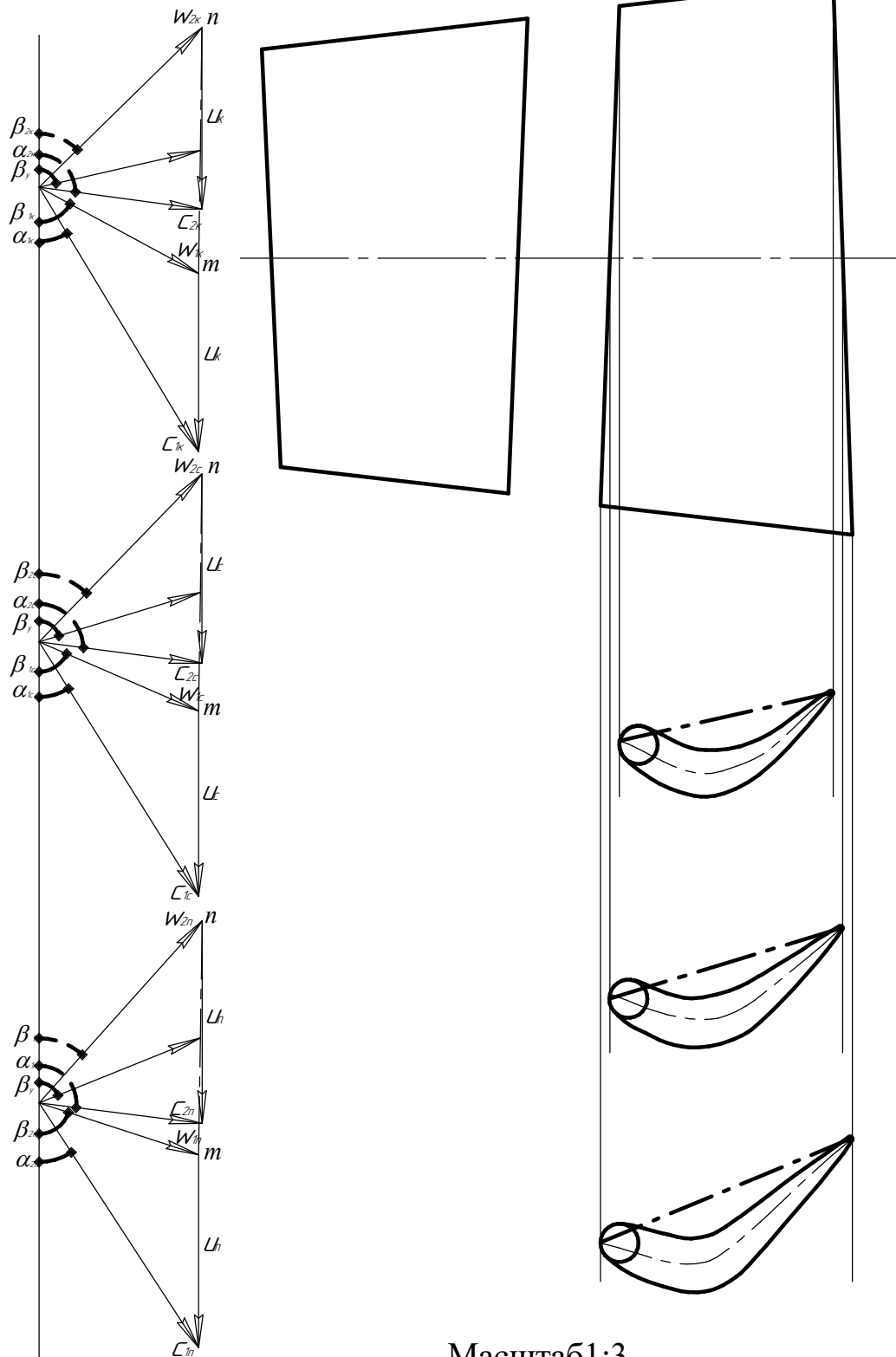
Продовж. табл. 2.1

| 1                                                                   | 2                                                                                                                              | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 4. Абсолютна швидкість виходу потоку із соплової решітки $c_1, м/с$ | $\frac{c_{1cp}}{r} \sqrt{1 + (\bar{r}^2 - 1) \sin^2 \alpha_{1cp}}$                                                             | 646,7 | 628,3 | 611,5 |
| 5. Кут виходу потоку із соплового апарата $\alpha_1, град$          | $arctg(\bar{r} \cdot tg \alpha_{1\bar{n}\delta})$                                                                              | 31,1  | 32,1  | 33,1  |
| 6. Характеристика ступеня $u/c_1$                                   | $\left(\frac{u}{\bar{n}_1}\right)_{\bar{n}\delta} \frac{\bar{r}^2}{\sqrt{1 + (\bar{r}^2 - 1) \sin^2 \alpha_{1\bar{n}\delta}}}$ | 0,577 | 0,618 | 0,660 |
| 7. Кут входу потоку до робочої решітки $\beta_1, град$              | $arctg \frac{\bar{r} tg \alpha_{1cp}}{1 - \left(\frac{u}{c_1}\right)_{cp} \frac{\bar{r}^2}{\cos \alpha_{1cp}}}$                | 61,6  | 66,62 | 72,0  |
| 8. Відносна швидкість входу до робочої решітки $w_1, м/с$           | $\frac{c_{1cp} \sin \alpha_{1cp}}{\sin \beta_1}$                                                                               | 379,6 | 363,7 | 351,1 |
| 9. Кут виходу потоку з робочої решітки $\beta_2, град$              | $\frac{c_{2cp} \sin \alpha_{2cp}}{\bar{r} u_{2cp} + \frac{c_{2cp} \cos \alpha_{2cp}}{\bar{r}}}$                                | 45,6  | 44,13 | 42,8  |
| 10. Відносна швидкість виходу з робочої решітки $w_2, м/с$          | $w_{2cp} \frac{\sin \beta_{2cp}}{\sin \beta_2}$                                                                                | 477,1 | 489,6 | 501,7 |
| 11. Кут виходу потоку зі ступеня $\alpha_2, град$                   | при $\alpha_{2cp} < 90^\circ$<br>$arctg(\bar{r} tg \alpha_{2cp})$                                                              | 97,7  | 97,44 | 97,2  |
| 12. Абсолютна швидкість потоку за ступенем $c_2, м/с$               | $\frac{w_{2cp} \sin \beta_{2cp}}{\sin \alpha_2}$                                                                               | 343,8 | 343,8 | 343,8 |
| 13. Міра реактивності $\rho$                                        | $\frac{\left(\frac{w_2}{\psi}\right)^2 - w_1^2}{\left(\frac{c_1}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{w_2}{\psi}\right)^2 - w_1^2}$ | 0,183 | 0,23  | 0,258 |

За результатами розрахунку будуємо трикутники швидкостей та профілю лопатки (рис.2.4).

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дубл.  |  |
| Взам. інв. №  |  |
| Підпис і дата |  |
| Інв. № подл.  |  |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 55   |



Масштаб 1:3

Масштаб швидкостей 1мм:14м/с

Рисунок 2.4 - Ескіз закрутки робочої лопатки 4-го ступеня турбіни

|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инд. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инд. № докл. | Подп. и дата |
|              |              |              |              |              |

|      |      |          |       |      |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|      |      |          |       |      |

КР.14.2.6231М.03.02.ПЗ

Лист

56





$$W_{\eta^6} = 0,084 \cdot b \cdot \delta \cdot \frac{1 + \left(\frac{h}{\delta}\right)^2}{1 + 0,46 \left(\frac{h}{\delta}\right)} = 1014,58 \cdot 10^{-6}$$

$$W_{\xi A} = -0,088 \cdot b^2 \cdot \delta = -64,37 \cdot 10^{-6}$$

$$W_{\xi C} = 0,066 \cdot b^2 \cdot \delta = 48,28 \cdot 10^{-6}$$

$$W_{\xi B} = -\infty$$

3. Визначення газодинамічного навантаження:

$$P_u = \frac{G}{z} (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = 1264,23$$

$$P_A = \frac{G}{z} (c_1 \sin \alpha_1 - c_2 \sin \alpha_2) + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{cp}}{z} \cdot l \cdot (P_1 - P_2) = 7832,53$$

$$P_{\xi} = P_A \cdot \sin \alpha + P_U \cdot \cos \alpha = 3987,19$$

$$P_{\eta} = P_A \cdot \cos \alpha - P_U \cdot \sin \alpha = 6859,24$$

4. Напряга від газодинамічних сил:

$$\sigma_{no}^r = \frac{P_{\eta} \cdot \frac{l}{2}}{W_{\xi i}} + \frac{P_{\xi} \cdot \frac{l}{2}}{W_{\eta i}}$$

Таблиця 2.3

| Точки                                          | A       | B     | C       |
|------------------------------------------------|---------|-------|---------|
| $\frac{P_{\xi} \cdot \frac{l}{2}}{W_{\eta i}}$ | -130,06 | 16,37 | -130,06 |
| $\frac{P_{\eta} \cdot \frac{l}{2}}{W_{\xi i}}$ | -444,0  | 0     | 591,97  |
| $\sigma_{no}^r$                                | -574,06 | 16,37 | 461,91  |

Максимальна напруга від газодинамічних сил у точці А.

5. Напряга від розтягнення відцентровими силами:

$$\sigma_{PO} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \cdot (R_n - r_0) \cdot \frac{(m + \mu)}{m + 1} = 94,69 \text{ МПа}$$

6. Сумарні напруги:

$$\sigma_{\Sigma}^{MAX} = \sigma_{PO} + 0,2 \cdot \left| \sigma_{no}^r \right|^{MAX} = 209,5 \text{ МПа}$$

7. Границя тривалої міцності:

$$\sigma_{тр} = 480 \text{ МПа}$$

$$\tau = 25000 \text{ ч}$$

8. Коефіцієнт запасу міцності:

$$n = \frac{\sigma_{TP}}{\sigma_{\Sigma}^{MAX}} = 2,291$$

|               |              |              |               |              |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |
|               |              |              |               |              |

|     |      |          |        |      |                        |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк. |
|     |      |          |        |      |                        | 58   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## 2.4 Визначення запасу міцності диска 4-го ступеня турбіни

У цьому пункті робиться оцінка міцності диска по руйнуючим оборотам. Задачею розрахунку є визначення коефіцієнта запасу міцності диска по руйнуючим оборотам. Для цього поздовжній переріз диска розбивається на ділянки в найбільш небезпечних переходах площі перерізу. Міцністний розрахунок ведеться без обліку отворів охолодження в полотнині диска.

На рис. 2.5 показаний профіль диска 4-го ступеня, що розраховується, і показані розрахункові перерізи.

Розрахунок запасу міцності диска змінної температури по руйнуючих оборотах зведений в табл. 2.4. Необхідні для розрахунку значення товщини диска  $h$  і радіусів  $r$  знімаються безпосередньо з рис.2.5.

Матеріал диска приймаємо ХН73 МБТЮ (ЭИ 698).

Початкові дані для розрахунку диска на міцність:

- густина матеріалу диска  $\rho_d = 8300 \text{ кг/м}^3$ ;
- густина матеріалу лопаток  $\rho_l = 7900 \text{ кг/м}^3$ ;
- частота обертання диска  $n = 3000 \text{ об/хв}$ ;
- допустима температура лопатки в кореневому перетині  $T_d = 1080 \text{ К (807 °C)}$ ;
- відцентрова сила, діюча в кореневому перетині лопаток  $C_o = 164501,9 \text{ Н}$ ;
- число лопаток, закріплених на диску  $z = 81$ ;
- внутрішній радіус диска  $r_i = 0,267 \text{ м}$ ;
- зовнішній розрахунковий радіус диска, який проходить по впадинам пазів кріплення лопаток  $r_a = 0,644 \text{ м}$ ;
- товщина поясу кріплення  $h_{кр} = 0,086 \text{ м}$ .

Визначаємо необхідні для розрахунку параметри:

1. Густина поясу кріплення,

$$\rho_{кр} = 0,5(\rho_l + \rho_d) = 8100 \text{ кг/м}^3;$$

2. Осьовий момент інерції поясу кріплення:

$$I_{кр} = \left( \frac{r_0^3 - r_a^3}{3} \right) \cdot h_{кр} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4.$$

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 59   |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |                        |  |  |  |  |      |

3. Кутова швидкість обертання диска на робочому режимі

$$w = \frac{\pi \cdot n}{30} = 403.5 \text{ об/хв.}$$

4. Відцентрова сила від пояса кріплення

$$C_{кр} = 2 \cdot \pi \cdot \rho_{кр} \cdot \varpi^2 \cdot I_{кр} = 9938320 \text{ Н.}$$

5. Сумарна відцентрова сила, яка діє на обід ротора від маси лопаток і елементів кріплення

$$C_{\Sigma} = z \cdot C_0 + C_{кр} = 23262974 \text{ Н.}$$

6. Силовий комплекс

$$G_a \cdot h_a \cdot r_a = \frac{C_{\Sigma}}{2 \cdot \pi} = 23262974 \text{ Н.}$$

7. Температура на зовнішньому радіусі диска

$$t_a = t_{\lambda} - \Delta t = 807 - 100 = 707^{\circ} \text{C}$$

8. Температура на внутрішньому радіусі диска

$$t_i = (200 \dots 300)^{\circ} \text{C. Прийнято } t_i = 250^{\circ} \text{C.}$$

9. Температура в різних перерізах диска змінюється по закону

$$t = t_i + (t_a - t_i) \cdot \left( \frac{r - r_i}{r_a - r_i} \right)^2;$$

10. Границя міцності матеріалу диска (для ЭИ 698) змінюється по закону

$$\sigma_{\theta} = (1211,3 - 0,2986 \cdot t) \cdot 10^6, \text{ Па.}$$

11. Запас міцності по руйнуючим оборотам визначається по формулі

$$K_{\theta} = \sqrt{\frac{\int_{r^*}^{r_a} \sigma_{\theta} \cdot h \cdot dr + \sigma_{\theta}^* \cdot h^* \cdot r^*}{\sigma_a \cdot r_a \cdot h_a + \rho \cdot w^2 \int_{r^*}^{r_a} r^2 \cdot h \cdot dr}}$$

За критерієм міцності, для задовільно працюючих дисків, запаси по руйнуючим оборотам складають

$$\kappa_{\theta} = \frac{n_p}{n} = 1,4 \dots 1,6.$$

Далі розрахунок ведеться в табличній формі – табл. 2.4.

|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
|---------------|------|--------------|--------|--------------|------------------------|---------------|--|--------------|------|
| Підпис і дата |      | Інв. № дубл. |        | Взам. інв. № |                        | Підпис і дата |  | Інв. № подл. |      |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              |      |
| Зм.           | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата         | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |               |  |              | Арк. |
|               |      |              |        |              |                        |               |  |              | 60   |

КР.14.2.6231М.03.02.ПЗ

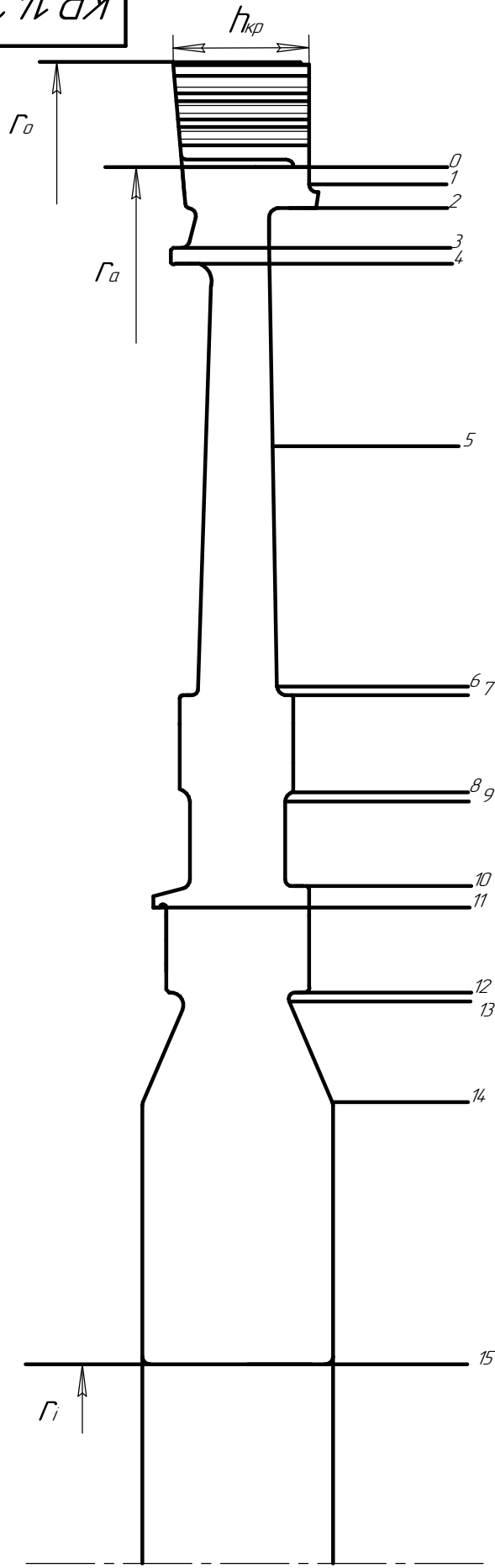


Рисунок 2.5 Профіль диску 4-го ступеня

|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инд. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инд. № дудл. | Подп. и дата |
|              |              |              |              |              |
| Изм.         | Лист         | № докум.     | Подп.        | Дата         |

КР.14.2.6231М.03.02.ПЗ

Лист  
61

Копировал

Формат А4

Таблиця 2.4 - Розрахунок запасу міцності диску

| Позначення                                                                | Розрахунковий переріз |              |                  |              |              |              |              |              |              |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                                           | 0                     | 1            | 2                | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            |
| 1.r, м                                                                    | 0,644                 | 0,638        | 0,6931           | 0,618        | 0,613        | 0,556        | 0,48         | 0,478        | 0,448        |
| 2.h, м                                                                    | 0,08                  | 0,079        | 0,08             | 0,055        | 0,044        | 0,042        | 0,05         | 0,064        | 0,069        |
| 3.t, °C                                                                   | 707                   | 692,219<br>3 | 837,084<br>9     | 644,705<br>1 | 633,248<br>4 | 514,567<br>6 | 390,436<br>8 | 387,696<br>6 | 349,833<br>8 |
| 4. $\sigma_{\epsilon}$ , Па                                               | 1,00E+<br>09          | 1,00E+<br>09 | 9,62E+<br>08     | 1,02E+<br>09 | 1,02E+<br>09 | 1,06E+<br>09 | 1,09E+<br>09 | 1,10E+<br>09 | 1,11E+<br>09 |
| 5. $\sigma_{\epsilon} h$ , Па м                                           | 800311<br>84          | 793794<br>62 | 769237<br>15     | 560445<br>08 | 449861<br>29 | 444297<br>05 | 547457<br>79 | 701269<br>62 | 763857<br>35 |
| 6. $2(\sigma_{\epsilon} h)_{cp}$ ,<br>Н/м                                 | 800311<br>84          | 1,59E+<br>08 | 1,56E+<br>08     | 1,33E+<br>08 | 1,01E+<br>08 | 894158<br>34 | 991754<br>84 | 1,25E+<br>08 | 1,47E+<br>08 |
| 7. $(\Delta r / r)$ , м                                                   | 0,322                 | 0,003        | -<br>0,02755     | 0,03755      | 0,0025       | 0,0285       | 0,038        | 0,001        | 0,015        |
| 8. $(\sigma_{\epsilon} h)_{cp}$ , Н                                       | 257700<br>41          | 478231,<br>9 | -<br>430615<br>3 | 499295<br>7  | 252576,<br>6 | 254835<br>1  | 376866<br>8  | 124872,<br>7 | 219769<br>0  |
| 9. $\int_r^{r_a} \sigma_{\epsilon} h dr$ , Н                              | 257700<br>41          | 262482<br>73 | 219421<br>21     | 269350<br>77 | 271876<br>54 | 297360<br>05 | 335046<br>74 | 336295<br>46 | 358272<br>37 |
| 10. $r^2$ , м <sup>2</sup>                                                | 0,41473<br>6          | 0,40704<br>4 | 0,48038<br>8     | 0,38192<br>4 | 0,37576<br>9 | 0,30913<br>6 | 0,2304       | 0,22848<br>4 | 0,20070<br>4 |
| 11. $r^2 h$ , м <sup>3</sup>                                              | 0,03317<br>9          | 0,03215<br>6 | 0,03843<br>1     | 0,02100<br>6 | 0,01653<br>4 | 0,01298<br>4 | 0,01152      | 0,01462<br>3 | 0,01384<br>9 |
| 12. $2(r^2 h)_{cp}$ , м <sup>3</sup>                                      | 0,03317<br>9          | 0,06533<br>5 | 0,07058<br>7     | 0,05943<br>7 | 0,03754      | 0,02951<br>8 | 0,02450<br>4 | 0,02614<br>3 | 0,02847<br>2 |
| 13. $(r^2 h)_{cp} \Delta r$ ,<br>м <sup>4</sup>                           | 0,01068<br>4          | 0,00019<br>6 | -<br>0,00194     | 0,00223<br>2 | 9,38E-<br>05 | 0,00084<br>1 | 0,00093<br>1 | 2,61E-<br>05 | 0,00042<br>7 |
| 14. $\int r^2 h dr$ , м <sup>4</sup>                                      | 0,01068<br>4          | 0,01088      | 0,00893<br>5     | 0,01116<br>7 | 0,01126<br>1 | 0,01210<br>2 | 0,01303<br>3 | 0,01305<br>9 | 0,01348<br>6 |
| 15.<br>$\rho \omega^2 \int r^2 h dr$ , Н                                  | 137414<br>25          | 139935<br>31 | 114922<br>44     | 143628<br>91 | 144836<br>01 | 155656<br>31 | 167632<br>81 | 167969<br>06 | 173462<br>15 |
| 16.<br>$\sigma_a h_a r_a + \rho \omega^2 \cdot \int r^2 h dr$ , Н         | 137414<br>25          | 139935<br>32 | 114922<br>45     | 143628<br>92 | 144836<br>02 | 155656<br>32 | 167632<br>81 | 167969<br>07 | 173462<br>16 |
| 17. $\sigma_{\epsilon}^* h^* r^*$ , Н                                     | 515400<br>82          | 506440<br>97 | 533158<br>27     | 346355<br>06 | 275764<br>97 | 247029<br>16 | 262779<br>74 | 335206<br>88 | 342208<br>09 |
| 18.<br>$\int_{r^*}^{r_a} \sigma_a h dr + \sigma_{\epsilon}^* h^* r^*$ , Н | 773101<br>24          | 768923<br>70 | 752579<br>47     | 615705<br>83 | 547641<br>51 | 544389<br>21 | 597826<br>47 | 671502<br>34 | 700480<br>46 |
| 19. $\kappa_{\epsilon}^2$                                                 | 5,62606<br>3          | 5,49485<br>1 | 6,54858<br>5     | 4,28678<br>2 | 3,78111<br>4 | 3,49737<br>9 | 3,56628<br>6 | 3,99777<br>4 | 4,03823<br>2 |
| 20. $\kappa_H$                                                            | 2,37193<br>2          | 2,34411      | 2,55902          | 2,07045<br>5 | 1,94450<br>9 | 1,87012<br>8 | 1,88846<br>1 | 1,99944<br>3 | 2,00953<br>5 |

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № подл.

Арк.

КР.142.6231м.03.02.ПЗ.

62

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

## Продовж. табл. 2.4

| Позначення                                                             | Розрахунковий переріз |          |          |          |          |          |          |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                                        | 9                     | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
| 1. $r$ , м                                                             | 0,445                 | 0,42     | 0,414    | 0,384    | 0,382    | 0,35     | 0,267    |
| 2. $h$ , м                                                             | 0,06                  | 0,072    | 0,098    | 0,083    | 0,067    | 0,119    | 0        |
| 3. $t$ , $^{\circ}\text{C}$                                            | 346,3816              | 319,9754 | 314,2656 | 289,3612 | 287,9169 | 268,4792 | 250,2733 |
| 4. $\sigma_{\epsilon}$ , Па                                            | 1,11E+09              | 1,12E+09 | 1,12E+09 | 1,13E+09 | 1,13E+09 | 1,13E+09 | 1,14E+09 |
| 5. $\sigma_{\epsilon} h$ , Па м                                        | 66484228              | 80348784 | 1,10E+08 | 93383030 | 75410378 | 1,35E+08 | 0        |
| 6. $2(\sigma_{\epsilon} h)_{cp}$ , Н/м                                 | 1,43E+08              | 1,47E+08 | 1,90E+08 | 2,03E+08 | 1,69E+08 | 2,10E+08 | 1,35E+08 |
| 7. $(\Delta r / r)$ , м                                                | 0,0015                | 0,0125   | 0,003    | 0,015    | 0,001    | 0,016    | 0,0415   |
| 8. $(\sigma_{\epsilon} h)_{cp}$ , Н                                    | 214304,9              | 1835413  | 569638,5 | 3043706  | 168793,4 | 3360622  | 5587084  |
| 9. $\int_r^{r_a} \sigma_{\epsilon} h dr$ , Н                           | 36041542              | 37876954 | 38446593 | 41490299 | 41659092 | 45019715 | 50606798 |
| 10. $r^2$ , $\text{м}^2$                                               | 0,198025              | 0,1764   | 0,171396 | 0,147456 | 0,145924 | 0,1225   | 0,071289 |
| 11. $r^2 h$ , $\text{м}^3$                                             | 0,011882              | 0,012701 | 0,016797 | 0,012239 | 0,009777 | 0,014578 | 0        |
| 12. $2(r^2 h)_{cp}$ , $\text{м}^3$                                     | 0,02573               | 0,024582 | 0,029498 | 0,029036 | 0,022016 | 0,024354 | 0,014578 |
| 13. $(r^2 h)_{cp} \Delta r$ , $\text{м}^4$                             | 3,86E-05              | 0,000307 | 8,85E-05 | 0,000436 | 2,20E-05 | 0,00039  | 0,000605 |
| 14. $\int r^2 h dr$ , $\text{м}^4$                                     | 0,013525              | 0,013832 | 0,013921 | 0,014356 | 0,014378 | 0,014768 | 0,015373 |
| 15. $\rho \varpi^2 \int r^2 h dr$ , Н                                  | 17395857              | 17791084 | 17904905 | 18465097 | 18493414 | 18994615 | 19772732 |
| 16. $\sigma_a h_a r_a + \rho \varpi^2 \cdot \int r^2 h dr$ , Н         | 17395857              | 17791084 | 17904905 | 18465097 | 18493415 | 18994615 | 19772733 |
| 17. $\sigma_{\epsilon}^* h^* r^*$ , Н                                  | 29585481              | 33746489 | 45345713 | 35859084 | 28806764 | 47119982 | 0        |
| 18. $\int_{r^*}^{r_a} \sigma_a h dr + \sigma_{\epsilon}^* h^* r^*$ , Н | 65627023              | 71623444 | 83792306 | 77349383 | 70465857 | 92139697 | 50606798 |
| 19. $\kappa_{\epsilon}^2$                                              | 3,772566              | 4,025805 | 4,679852 | 4,188951 | 3,810322 | 4,850832 | 2,559424 |
| 20. $\kappa_H$                                                         | 1,94231               | 2,006441 | 2,163297 | 2,046693 | 1,952005 | 2,202461 | 1,59982  |

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № подл.

Арк.

КР.142.6231м.03.02.ПЗ.

63

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

#### 4.2.5 Система охолодження ГТД

У двигуні передбачається повітряне охолодження соплових лопаток перших трьох ступенів, робочих лопаток перших двох ступенів, корпусів, дисків турбін, п'яти останніх дисків компресора і трьох силових дисків барабана між компресором і турбіною. Крім цього, у розвантажувальну порожнину турбіни і на підпір масляної порожнини опорного вінця компресора подається повітря через п'яту ступінь компресора.

Повітря на охолодження турбіни і компресора відбирається з порожнини камери згоряння (через компресор). Через п'яту, шосту, восьму, десяту ступінь компресора.

Для зниження температури повітря, що відбирається з порожнини камери згоряння, на охолодження диска і робочих лопаток першого ступеня, соплових лопаток другого ступеня в двигуні застосований повітроохолоджувач із системою зовнішніх труб. Крім цього, система зовнішніх труб передбачає підведення більш холодного повітря через восьму ступінь компресора на охолодження соплового апарата третього ступеня, підведення повітря через п'яту ступінь в розвантажувальну порожнину і на підпір масляної порожнини опорного вінця компресора.

Повітря на охолодження соплових лопаток і корпусних деталей першого соплового апарата відбирається з порожнини камери згоряння, і через 108 пазів у внутрішньому корпусі надходить у порожнину А під сопловими лопатками. Відкіль повітря через внутрішні порожнини дефлекторів надходить на охолодження соплових лопаток і в порожнину Б над верхніми полками соплових лопаток. У порожнину Б також надходить невелика кількість повітря з порожнини камери згоряння через нещільність (4) у проміжному сегментному корпусі.

Сопловий апарат першого ступеня складається із сорока одиночних литих охолоджуваних лопаток. Лопатки двохопорні, фіксовані в окружному напрямку. Конструктивно соплова лопатка виконана однопорожнинною з одним дефлектором і розділово-розпірною пластиною і конвективно-плівковою системою охолодження. Менша частина охолоджуваного повітря, подаваного на охолодження соплової лопатки, з порожнини дефлектора через отвори в розділовій пластині надходить у

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |              |              |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |              |              |               |
| <p>рата третього ступеня, підведення повітря через п'яту ступінь в розвантажувальну порожнину і на підпір масляної порожнини опорного вінця компресора.</p> <p>Повітря на охолодження соплових лопаток і корпусних деталей першого соплового апарата відбирається з порожнини камери згоряння, і через 108 пазів у внутрішньому корпусі надходить у порожнину А під сопловими лопатками. Відкідля повітря через внутрішні порожнини дефлекторів надходить на охолодження соплових лопаток і в порожнину Б над верхніми полками соплових лопаток. У порожнину Б також надходить невелика кількість повітря з порожнини камери згоряння через нещільність (4) у проміжному сегментному корпусі.</p> <p>Сопловий апарат першого ступеня складається із сорока одиночних литих охолоджуваних лопаток. Лопатки двохопорні, фіксовані в окружному напрямку. Конструктивно соплова лопатка виконана однопорожнинною з одним дефлектором і розділово-розпірною пластиною і конвективно-плівковою системою охолодження. Менша частина охолоджуваного повітря, подаваного на охолодження соплової лопатки, з порожнини дефлектора через отвори в розділовій пластині надходить у</p> |               |              |              |               |
| Зм.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |              |              |               |
| КР.142.6231м.03.02.ПЗ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |               |              |              | Арк.          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |              |              | 64            |

порожнину, що роздає, у вхідного краю лопатки. З цієї порожнини охолоджуване повітря після конвективного охолодження вхідної крайки через шість рядів отворів на вхідній крайці лопатки перетікає на зовнішню поверхню, утворюючи загороджувальне охолодження лопатки.

Велика частина повітря через отвори в дефлекторі з боку спинки і корита подається з порожнини дефлектора в охолодний тракт основної частини лопатки. Остудивши лопатку, повітря скидається в проточну частину турбіни через щілинні канали у вихідній крайці. Інше повітря через внутрішню порожнину дефлектора (3) перетікає в порожнину Б над сопловими лопатками.

Повітря з порожнин А и Б через отвори (5,6,7,8) діаметром 1.2 мм, розташованих у два ряди на верхніх і нижніх полках соплових лопаток, перетікає в проточну частину, утворюючи плівкове охолодження полиць соплових лопаток. Надлишки повітря в порожнинах А и Б по нещільностям у полках і стиках полиць з корпусом перетікають у проточну частину, охороняючи ці порожнини від надходження в них гарячого газу з проточної частини.

Крім цього, для плівкового охолодження передніх частин полиць соплових лопаток у жарових трубах виконані один верхній (9) і один нижній (10) ряди отворів діаметром 2.4 мм. У кожному ряді по 760 отворів. Повітря, перетікаючи з порожнини камери згоряння через ці отвори в проточну частину, утворить загороджувальне охолодження полиць соплових лопаток.

Повітря на охолодження робочих лопаток і диска першого ступеня корпусів і соплових лопаток другої ступеня відбирається з порожнини камер згоряння через 72 отвори (11) у діафрагмі діаметром 60мм і надходить у порожнину В. З порожнини В по чотирьох трубах 95x3 мм (12), а потім двом трубам 130x4 мм (13) надходить у повітроохолоджувач (14).

Після повітроохолоджувача повітря по чотирьох зовнішніх трубах (15) 63x1.8 мм і чотирьом місцевим кишенькам (16) і 28 отворам (17) діаметром 22 мм подається в порожнину, що роздає, Г. З порожнини Г невелика частина повітря через 120 пазів (18) надходить у кільцевий зазор Д., утворений проміжним корпусом і покривним кільцем. Проміжний корпус для інтенсивного охолодження має три

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 65   |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  |      |



ділянки оребріння (19). Після охолодження проміжного корпуса повітря по 480 отворам (20) діаметром 4.5 мм, 180 отворам (21) діаметром 1.2 мм, 108 отворам (22) діаметром 1.5 мм і 216 отворам (23) діаметром 1.5 мм надходить на охолодження вставок над робочими лопатками першого ступеня елементів корпусу з боку першого і другого соплових апаратів.

Надлишки повітря в порожнинах над першим робочим колесом перетікають через нещільності в зачепах і секторних перерізах у проточну частину, додатково прохолоджуючи корпусні деталі й охороняючи ці порожнини від надходження гарячого газу з проточної частини.

Повітря після повітроохолоджувача з порожнини Г через 60 отворів (24) діаметром 10.5 мм надходить у порожнину Е над другим сопловим апаратом. Відкілья велика частина повітря надходить на охолодження соплових лопаток другого ступеня через відкритий верхній торець дефлектора. Остудивши лопатку, повітря через щілинні канали у вихідній крайці скидаються в проточну частину. Менша частина повітря через 48 отворів (25) діаметром 6.5 мм і 216 отворів (26) діаметром 6 мм надходить у порожнині Ж, З, розташовані над робочими лопатками. З порожнини Е над сопловими лопатками повітря по 384 отворам (27) діаметром 1.5 мм перетікає в проточну частину, утворюючи загороджувальне охолодження верхніх полиць соплових лопаток. Невелика кількість повітря з цієї порожнини Е також через отвори (28) надходить на охолодження бандажних полиць робочих лопаток другого ступеня.

Надлишки повітря в порожнинах Е, Ж, З перетікають по нещільностям кріплень соплових лопаток і вставок над робочими лопатками з корпусом у проточну частину, охороняючи ці порожнини від надходження в них гарячого газу з проточної частини.

Повітря на охолодження соплових лопаток третього ступеня і корпусів третьої і четвертого ступенів відбираються через восьму ступінь компресора і через чотири пази (29) 189x17 мм, чотири зовнішні труби (30) 53x1.8 мм, дросельні шайби (31) діаметром 36.5 мм подається в порожнину, що роздає, ІІ над третім сопловим апаратом. Основна частина повітря з порожнини ІІ через відкритий верхній

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 66   |

торець дефлектора надходить на охолодження соплових лопаток третього ступеня. Литі соплові лопатки третього ступеня пакетної конструкції мають трубчастий дефлектор у вхідній крайки і «вихрове» оребріння на іншій частині лопатки. Остудивши соплові лопатки, повітря через отвори у вихідній крайці з боку корита перетікає в проточну частину.

Інша частина повітря через спеціально виконані отвори, пази і нещільності (32, 33, 34, 35, 36) з порожнини II послідовно перетікає в порожнині над робочими і сопловими лопатками третього і четвертого ступенів. Остудивши елементи корпусу, повітря перетікає в проточну частину через нещільності в стиках пакетів, кріплення соплових лопаток, уставок над робочими лопатками, проміжних кілець до силового корпусу, охороняючи ці порожнини від надходження гарячого газу. Крім цього з порожнини, що роздає, II повітря через 324 отвори (37) діаметром 1.4 мм подається на охолодження бандажних полиць робочих лопаток третього ступеня.

На охолодження диска і робочих лопаток першого ступеня повітря відбирається з повітроохолоджувача (14) і по двох зовнішніх трубах (38) 95x3 мм, дросельним шайбам (39) діаметром 52.1 мм, двом внутрішнім трубам (40) 95x3 мм в опорному вінці, одній центральній трубі (41) з внутрішнім діаметром 180 мм, шести радіальним патрубкам (42) діаметром 76 мм надходить у порожнину перед диском першого ступеня. Відкіль повітря по 82 радіальних отворах (43) в ободу диска надходить у порожнину К під хвостовиком робочих лопаток. Основна частина повітря з порожнини К по каналах у хвостовиках і подовжених ніжках лопаток надходить на охолодження робочих лопаток. Остудивши робочі лопатки, повітря через канали у вихідних крайках впливає в проточну частину. Невелика кількість повітря через 164 отвори діаметром 3мм і 5 мм у денцях робочих лопаток перетікають у радіальний зазор.

Інша частина повітря через передні нещільності між западинами диска і хвостовиками лопаток і спеціально виконані 82 отвору (44) діаметром 5 мм у передніх торцях хвостовиків лопаток надходить у зазор між передньою ущільнювальною стрічкою і хвостовиками лопаток і виступами диска. З цього зазору повітря перетікає через нещільності передніх і задньої ущільнювальних стрічок, по монтажних

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--|--|--|--------------|---------------|--|------------------------|--|--|--|------|--|--|--|
| Інв. № подл.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Підпис і дата |  |  |  | Інв. № дубл. | Підпис і дата |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
| <p>льним шайбам (39) діаметром 52.1 мм, двом внутрішнім трубам (40) 95х3 мм в опорному вінці, одній центральній трубі (41) з внутрішнім діаметром 180 мм, шести радіальним патрубкам (42) діаметром 76 мм надходить у порожнину перед диском першого ступеня. Відкіля повітря по 82 радіальних отворах (43) в ободу диска надходить у порожнину К під хвостовиком робочих лопаток. Основна частина повітря з порожнини К по каналах у хвостовиках і подовжених ніжках лопаток надходить на охолодження робочих лопаток. Остудивши робочі лопатки, повітря через канали у вихідних крайках впливає в проточну частину. Невелика кількість повітря через 164 отвори діаметром 3мм і 5 мм у денцях робочих лопаток перетікають у радіальний зазор.</p> <p>Інша частина повітря через передні нещільності між западинами диска і хвостовиками лопаток і спеціально виконані 82 отвору (44) діаметром 5 мм у передніх торцях хвостовиків лопаток надходить у зазор між передньою ущільнювальною стрічкою і хвостовиками лопаток і виступами диска. З цього зазору повітря перетікає через нещільності передніх і задньої ущільнювальних стрічок, по монтажних</p> |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  |      |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  | Арк. |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |  |  |  |              |               |  |                        |  |  |  | 67   |  |  |  |
| Зм. Арк. № докум. Підпис Дата                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |               |  |  |  |              |               |  | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |      |  |  |  |

зазорах замкового з'єднання, зазорами між виступами диска і проміжних полків робочих лопаток і спеціально виконаним 164 отворам (45) діаметром 1.3 мм перетікає в периферійні порожнини перед і за диском першого ступеня. Крім цього в периферійну порожнину перед диском першого ступеня надходить повітря через п'ятнадцяту ступінь робочих лопаток компресора через кільцевий зазор (46) і подвійний лабіринт (47). Відкіля велика частина повітря через вікна в передніх (48) і задніх (49) стінках подовжених ніжок перетікає в периферійну порожнину за диском першого ступеня. Менша частина повітря через периферійний перехід скидається в проточну частину. З периферійної порожнини за диском першого ступеня повітря через 144 отвори (50) діаметром 12 мм у діафрагмі і 336 отворів (51) діаметром 1.7 мм у нижніх полках соплових лопаток другого ступеня перетікає в проточну частину, утворюючи плівкове охолодження полиць. Інше повітря через нещільності в діафрагмі і лабіринтове ущільнення (52) перетікає в периферійну порожнину перед диском другого ступеня.

На охолодження диска і робочих лопаток другого ступеня повітря відбирається через десяту ступінь компресора і через 120 отворів (53) діаметром 12.5 мм, 16 радіальних трубок (54) діаметром 40 мм, центральну трубу (55) діаметром 200 мм, кільцеві зазори (56, 57, 58) між екранами і диском другого ступеня надходить у порожнину перед диском другого ступеня. Відкіля повітря по 78 отворам (59) діаметром 16 мм в ободу диска надходить у порожнину Л під ніжками робочих лопаток другого ступеня.

На відміну від першого ступеня замкове з'єднання ущільнюється секторною стрічкою тільки з вхідної сторони. А вихідна сторона ущільнюється за рахунок невеликих зазорів між хвостовиками лопаток і западинами диска, виступами диска і проміжних полків лопаток. Крім цього, хвостовики лопаток із вхідної сторони диска не мають ущільнювальних буртів.

З порожнини Л під ніжками робочих лопаток основна частина повітря через канали в хвостовиках і подовжених ніжках лопаток надходить на охолодження робочих лопаток другого ступеня. Остудивши лопатки, повітря через щілини у вихідних крайках лопаток скидається в проточну частину. Невелика кількість повітря

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  | 68   |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |      |

після охолодження робочих лопаток через 234 отвори діаметром 2 мм і 3 мм перетікає на охолодження бандажних полиць робочих лопаток. Інше повітря з порожнини Л надходить у зазор, що роздає, утвореною ущільнювальною секторною стрічкою, ніжками лопаток і виступами диска. У цей зазор так само додатково надходить повітря через 78 отворів діаметром 5 мм у передніх торцях ніжок лопаток. З зазору, що роздає, повітря по нещільностям у замкових з'єднаннях, ущільнювальній стрічці і проміжних полицях лопаток перетікає в порожнині перед і за диском другого ступеня. З порожнини перед диском другого ступеня це повітря, змішуючи з повітрям, що надійшло після охолодження диска першого ступеня, через вікна (60) 15x5 мм надходить на охолодження подовжених ніжок лопаток. А потім через нещільності перетікає в порожнину за диском другого ступеня й у проточну частину. З периферійної порожнини за диском другого ступеня повітря через отвори (61) у передній стінці, нещільності в задній стінці діафрагми і лабіринтове ущільнення (62) надходить у периферійну порожнину перед диском третього ступеня.

На охолодження дисків і діафрагм третього і четвертого ступенів повітря відбирається через сьому ступінь компресора через 100 отворів (63) діаметром 16 мм. Потім по двадцятьох радіальних трубках (64) діаметром 40 мм, кільцевому зазорі (65) повітря надходить на охолодження п'яти останніх ступенів компресора. Остудивши диски компресора, повітря через 24 отвори (66) діаметром 45 мм надходить у порожнину під силові диски барабана компресора. Відкіль через чотири пістони (67) діаметром 71 мм і кільцеві зазори (68, 69) надходить у порожнину М перед диском третього ступеня. З цієї порожнини М велика частина повітря через 18 отворів (70) діаметром 10 мм у цапфі і 74 отвору (71) діаметром 14 мм в ободу диска третього ступеня подається на охолодження периферійної частини диска і діафрагми третього ступеня. Менша частина повітря з порожнини М перетікає по 12 фрезеруванням (72) 42x5.2 мм у центральну порожнину Н на охолодження диска і діафрагми четвертого ступеня.

Аналогічно другого ступеня повітря з порожнин під ніжками лопаток надходить у зазор між ущільнювальною стрічкою і диском. Остудивши замкове з'єднання, повітря по нещільностям перетікає в периферійні порожнини перед і за диском

|               |               |          |        |      |                        |
|---------------|---------------|----------|--------|------|------------------------|
| Інв. № подл.  | Підпис і дата |          |        |      | Арк.<br>69             |
|               | Інв. № дубл.  |          |        |      |                        |
|               | Взам. інв. №  |          |        |      |                        |
| Підпис і дата |               |          |        |      | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |
| Інв. № дубл.  |               |          |        |      |                        |
| Взам. інв. №  |               |          |        |      |                        |
| Зм.           | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата |                        |

третього ступеня. З порожнини перед диском третього ступеня повітря, змішуючи з повітрям, що перетікає в цю порожнину через лабіринтове ущільнення (62) і отвір (70) через 74 вікна (73) 16x3 мм надходить на охолодження подовжених ніжок робочих лопаток третього ступеня. З периферійної порожнини за диском третього ступеня частина повітря через 96 отворів (74) діаметром 12 мм у передній стінці діафрагми четвертого ступеня, лабіринтове ущільнення (75) і нещільності перетікає в периферійну порожнину О перед диском четвертого ступеня. Надлишки повітря з порожнини за диском третього ступеня через перекриття (76) і нещільності в нижніх полках соплових лопаток скидаються в проточну частину.

У порожнину Н, крім повітря через сьому ступінь компресора, підтікає через лабіринтове ущільнення (77), отвір (78), кільцевий зазор (79) невелика кількість більш холодного повітря. Змішуючи з повітрям через сьому ступінь і знижуючи його температуру, повітря через 36 отворів (80) діаметром 30 мм у цапфі перетікає в середню порожнину П. Відкіля частина повітря через 12 отворів (81) діаметром 8.5 мм надходить у порожнину О перед диском четвертого ступеня. Остудивши замкове з'єднання, повітря через нещільності перетікає в периферійні порожнини перед (О) і за (Р) диском четвертого ступеня. З порожнини О повітря, змішуючись з повітрям, що поступає через лабіринтове ущільнення (75) і отвору (81) подається на охолодження подовжених ніжок робочих лопаток четвертого ступеня через 72 вікна (82) 16x5 мм.

На розвантаження осьових зусиль, охолодження диска четвертого ступеня і підпір масляної порожнини опорного вінця турбіни повітря відбирається через п'яту ступінь компресора. Через 56 пазів (83) 40x20, розташованих над спрямляючим апаратом п'ятого ступеня, і через 56 пазів (84) 77x26, розташованих за п'ятим ступенем повітря надходить у колектор (85). Потім по зовнішній трубі (86) і внутрішній трубі (87) розміром 76x2.5 повітря підводиться в розвантажувальну порожнину за диском четвертого ступеня. Для регулювання тиску в розвантажувальній порожнині, отже й осьовому зусиллі між зовнішньою внутрішньою трубою встановлена дросельна шайба (88) діаметром 26,2 мм. З порожнини С повітря після охолодження роторних і статорних деталей через лабіринтове ущільнення (89) надходить на

|               |      |              |        |              |                                                                        |               |  |              |  |      |
|---------------|------|--------------|--------|--------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|--|--------------|--|------|
| Підпис і дата |      | Інв. № дубл. |        | Взам. інв. № |                                                                        | Підпис і дата |  | Інв. № подл. |  |      |
|               |      |              |        |              |                                                                        |               |  |              |  |      |
| Зм.           | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата         | <div style="text-align: center;"> <b>КР.142.6231м.03.02.ПЗ.</b> </div> |               |  |              |  | Арк. |
|               |      |              |        |              |                                                                        |               |  |              |  | 70   |

підпір масляної порожнини і підбурення. Надлишки повітря з порожнини С, прохолоджуючи деталі, через верхнє лабіринтове ущільнення (90) перетікає в периферійну порожнину Р за диском четвертого ступеня. Змішуючи з повітрям, що перетікає в цю порожнину після охолодження диска четвертого ступеня, скидається в проточну частину за турбіною через задній перехід (91).

Підпір масляної порожнини опорного вінця турбіни з боку газовихлопу забезпечується повітрям, що відбирається через компресор, після повітроохолоджувача, що через зовнішні і внутрішні труби подається в порожнину Ю за опорним вінцем турбіни і йде на охолодження диска, замкових з'єднань і робочих лопаток першого ступеня. Підпір масляної порожнини з боку турбіни забезпечується повітрям через п'яту ступінь компресора, що надходить у розвантажувальну порожнину С за диском четвертого ступеня.

Повітря з порожнини Ю через лабіринтове ущільнення (92) надходить у міжлабіринтну порожнину Т. У цю порожнину також надходить невелика кількість повітря через ущільнювальне кільце (93) і десять розвантажувальних отворів (94) діаметром 10 мм. Велика частина повітря з цієї порожнини перетікає через 14 отворів (95) діаметром 8 мм і кільцевий зазор між екранами (96) на охолодження диска і замкового з'єднання четвертого ступеня. Це дозволяє знизити тиск у порожнині Т на  $5.5 - 6 \text{ кг/см}^2$  і є основним стравлюванням. Інше повітря з порожнини Т через лабіринтове ущільнення перетікає в міжлабіринтну порожнину У, що через отвори (97) діаметром 8 мм, кільцевий зазор між кожухами (98) і отвору в цапфі ротора (99) вільно повідомляється з порожниною Ш.

З порожнини У повітря по лабіринтовому ущільненню перетікає в порожнину Ф, що через 10 пазів (100), кільцевий зазор між кожухами (101) і вісім отворів у цапфі (102) гідравлічно вільно зв'язана з міжлабіринтною порожниною Х. Прокідні площі отворів (97), пазів (100), кільцевих зазорів (98, 101) і отворів (99, 102) у цапфі ротора підібрані так, що при будь-яких перетічках повітря по сполучному тракті дозволяє тримати попарно близькі тиски в сполучених порожнинах У и Ш і порожнинах Ф и Х.

|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|--|--|--|--|------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |                        |  |  |  |  | Арк.<br>71 |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
|              |               |              |              |               |                        |  |  |  |  |            |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. |  |  |  |  |            |

Для забезпечення необхідних надлишкових тисків  $\Delta P=0.1-0.15 \text{ кг/см}^2$  перед лабіринтовими ущільненнями масляної порожнини Ф(103,104) з порожнини Х, а отже з порожнини Ф, тому що вони сполучуються, передбачене зтавлення повітря в атмосферу через десять отворів (105), трубу підбурення (106) і дросельну шайбу (107). З порожнини Ш, а отже і зі сполученої порожнини У, також передбачене зтавлення повітря в атмосферу через 20 отворів (108) діаметром 10 мм. Кільцевий зазор (109), вісім отворів (110) діаметром 13 мм, трубу зтавлення (111) і дросельну шайбу (112).

Дросельні шайби підбираються з таким розрахунком, щоб перепад тиску на лабіринтових ущільненнях (103,104) складав  $\Delta P=0.1-0.15 \text{ кг/см}^2$ . Дросельні шайби встановлюються на виході труб зтавлення з корпуса опорного вінця турбіни.

Підпір масляної порожнини опорного вінця компресора забезпечується повітрям, що відбирається через п'яту ступінь компресора. Повітря через п'яту ступінь відбирається через два фланці (113) внутрішнім діаметром 29 мм, установлених на колекторі клапанів зтавлення. Потім повітря через дві дросельні шайби (114) діаметром 15 мм, дві зовнішні (115) і дві внутрішні (116) труби 32x1.8 підводиться до трійників (117).

Частина цього повітря через двох труб (118) 22x1.2 мм і 45 отворів (119) у лабіринтовій кришці діаметром 5 мм проводиться в передню міжлабіринтну порожнину. Відкіля повітря через лабіринтне ущільнення (120) передається в атмосферу, а через лабіринтне ущільнення (121) у масляну порожнину.

Інша частина повітря по двох трубах (122) 22x1.2 надходить у задню міжлабіринтну порожнину. Відкіля через лабіринтні ущільнення (123 і 124) повітря перетікає в проточну частину компресора, перед першим ступенем, і в масляну порожнину.

Дросельні шайби підбираються таких розмірів, щоб забезпечити в міжлабіринтних порожнинах надлишковий тиск  $\Delta P=0.1-0.15 \text{ кг/см}^2$ .

|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|--------------|---------------|--|--|--|-----|------|----------|--------|------|------------------------|------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата |  |  |  | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк.<br>72 |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
| Інв. № дубл. | Підпис і дата |  |  |  | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк.<br>72 |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
| Взам. інв. № | Підпис і дата |  |  |  | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк.<br>72 |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
| Інв. № подл. | Підпис і дата |  |  |  | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.02.ПЗ. | Арк.<br>72 |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |
|              |               |  |  |  |     |      |          |        |      |                        |            |

метром 15 мм, дві зовнішні (115) і дві внутрішні (116) труби 32х1.8 підводиться до трійників (117).

Частина цього повітря через двох труб (118) 22х1.2 мм і 45 отворів (119) у лабіринтовій кришці діаметром 5 мм проводиться в передню міжлабіринтну порожнину. Відкіля повітря через лабіринтне ущільнення (120) передається в атмосферу, а через лабіринтове ущільнення (121) у масляну порожнину.

Інша частина повітря по двох трубах (122) 22х1.2 надходить у задню міжлабіринтну порожнину. Відкіля через лабіринтні ущільнення (123 і 124) повітря перетікає в проточну частину компресора, перед першим ступенем, і в масляну порожнину.

Дросельні шайби підбираються таких розмірів, щоб забезпечити в міжлабіринтних порожнинах надлишковий тиск  $\Delta P=0.1-0.15 \text{ кг/см}^2$ .

|              |               |  |              |  |              |  |               |  |
|--------------|---------------|--|--------------|--|--------------|--|---------------|--|
| Інв. № подл. | Підпис і дата |  | Взам. інв. № |  | Інв. № дубл. |  | Підпис і дата |  |
|              |               |  |              |  |              |  |               |  |
|              |               |  |              |  |              |  |               |  |
|              |               |  |              |  |              |  |               |  |
|              |               |  |              |  |              |  |               |  |

|            |      |                  |        |      |                       |  |  |  |  |      |  |      |         |
|------------|------|------------------|--------|------|-----------------------|--|--|--|--|------|--|------|---------|
|            |      |                  |        |      | КР.142.6231м.03.03.ПЗ |  |  |  |  |      |  |      |         |
|            |      |                  |        |      |                       |  |  |  |  |      |  |      |         |
| Зм.        | Лист | № докум.         | Підпис | Дата |                       |  |  |  |  |      |  |      |         |
| Студент.   |      | Костріков В.А.   |        |      | Охорона праці         |  |  |  |  | Літ. |  | Арк. | Аркушів |
| Керівник   |      | Козловський А.В. |        |      |                       |  |  |  |  |      |  | 73   | 82      |
| Консульт.  |      |                  |        |      |                       |  |  |  |  | НУК  |  |      |         |
| Зав.кафедр |      | Патлайчук В.М.   |        |      |                       |  |  |  |  |      |  |      |         |
|            |      |                  |        |      |                       |  |  |  |  |      |  |      |         |



### 3. Охорона праці

#### Вступ

Охорона праці – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, зберігання здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Основна задача охорони праці – звести до мінімуму можливість ураження або захворювання працюючих з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Охорона праці включає в себе виробничу санітарію, техніку безпеки, пожежну та вибухову безпеку, законодавство про охорону праці.

Виробнича санітарія – це система організаційних та технічних заходів, які запобігають або зменшують вплив на працюючих шкідливих виробничих факторів.

Техніка безпеки – це система організаційних та технічних заходів, які запобігають впливу на працюючих небезпечних виробничих факторів.

Пожежна та вибухова безпека – це система організаційних і технічних засобів, які направлені на профілактику та ліквідацію пожеж та вибухів, обмеження їх наслідків.

Законодавство про охорону праці – це частина трудового законодавства.

Значення охорони праці давно вийшло за рамки соціальної сфери. Вона починає значно впливати на економічні показники підприємства, що в умовах ринку значно важливо. Погані умови труда – це причина зниження працездатності і підвищення втомлюваності людини, зріст браку, що значно знижує економічні показники підприємства.

#### 3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів в приміщенні електростанції

Небезпечний виробничий фактор – це фактор, вплив якого на працюючого, в певних умовах, призводить до травми або до іншого різкого погіршення здоров'я.

Шкідливий виробничий фактор – це фактор, вплив, якого на працюючого, в певних умовах, призводить до захворювань або до зниження працездатності.

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 74   |
|               |      |          |        |      |                       |      |

В приміщенні електростанції мають місце наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори (ГОСТ 12.0.003-74):

- підвищена температура поверхні обладнання;
- підвищений рівень шуму;
- підвищений рівень вібрації;
- небезпека враження електричним струмом;
- підвищена вибухова небезпека;
- вміст в повітрі робочої зони газу.

В газотурбінному двигуні, як і в будь-якому тепловому двигуні, не все тепло, що підводиться, перетворюється в корисну роботу, частина відводиться з циклу у вигляді втрат, (5 - 6)% котрих складають втрати від випромінювання корпусу і трубопроводів газотурбінної установки.

В приміщеннях електростанції оптимальними мікрокліматичними умовами є:

- температура повітря в холодну пору року (20...30)<sup>0</sup>С, в теплий період (22...25)<sup>0</sup>С;
- оптимальна вологість повітря (60 – 40)%;
- швидкість руху повітря (0,2...0,5) м/с.

Також важливим недоліком газотурбінної установки є виробничий шум. При роботі установки виникає шум з частотою понад 2000 Гц та рівня звукового тиску понад 140 дБ. Основними джерелами шуму в газотурбінному агрегаті є: вхідний тракт осьового компресора, вихідний тракт турбіни, корпус газотурбінної установки і камери згорання, нагнітач з патрубками, теплообмінні апарати газотурбінного агрегату, насоси, вентилятори, трубопроводи, рама-маслобак. В табл. 3.1 приведені допустимі рівні шуму на робочому місці (ГОСТ 12.1.003-83).

Таблиця 3.1 - Допустимі рівні шуму на робочому місці

| Тип приміщення | Частота октавних полос, Гц |     |     |     |      |      |      |      | Рівень шуму |
|----------------|----------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------|
|                | 63                         | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 5000 |             |
| Робоча зона    | Рівень звукового тиску, дБ |     |     |     |      |      |      |      | 85          |
|                | 99                         | 92  | 86  | 83  | 80   | 78   | 76   | 74   |             |

|                                                                                                                                                                                |              |              |               |              |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-----|------|----------|--------|------|--|--|--|--|--|
| Підпис і дата                                                                                                                                                                  | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                |              |              |               |              |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |
| <table border="1"> <tr> <td>Зм.</td> <td>Арк.</td> <td>№ докум.</td> <td>Підпис</td> <td>Дата</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> |              |              |               |              | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |  |  |  |  |
| Зм.                                                                                                                                                                            | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата         |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                |              |              |               |              |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |
| <div> <div>КР.142.6231м.03.03.ПЗ</div> <div>Арк.</div> </div>                                                                                                                  |              |              |               | 75           |     |      |          |        |      |  |  |  |  |  |

В процесі роботи газотурбінної установки виникає вібрація, головною причиною якої є неврівноважений силовий вплив. При роботі газотурбінного двигуна всі його деталі і вузли здійснюють резонансні і вимушені коливання механічного та аеродинамічного характеру. Вібрація виникає при роботі ротора, передач приводних механізмів та підшипників. Ця вібрація передається крізь корпус газотурбінного двигуна на раму. Вібрація, яка виникає, негативно впливає на навколишнє середовище і людину.

Згідно ГОСТ 12.1.012 – 90 параметрами для нормування при оцінюванні вібрації є середньоквадратичні значення швидкості та їх логарифмічні рівні в октавних полосах середньо геометричних частот. Норми обмеження загальної вібрації приведені в табл. 3.2

Таблиця 3.2 - Норми обмеження загальної вібрації

| Тип приміщення | Середньоквадратичне значення віброшвидкості, м/с |      |      |     |      |     |
|----------------|--------------------------------------------------|------|------|-----|------|-----|
|                | 1,3                                              | 0,45 | 0,22 | 0,2 | 0,2  | 0,2 |
|                | Октавні полоси середньологарифмічних частот, Гц  |      |      |     |      |     |
|                | 2                                                | 4    | 8    | 16  | 31,5 | 63  |
|                | Логарифмічні рівні швидкості, дБ                 |      |      |     |      |     |
|                | 108                                              | 99   | 93   | 92  | 92   | 92  |

В зв'язку з використанням різноманітного електричного обладнання при роботі газотурбінного двигуна виникає небезпека ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом. Тому необхідно передбачити, щоб обладнання було заземлене, а також видати працюючим засоби індивідуального захисту від ураження електричним струмом (діелектричні рукавиці, резинові килимки).

Під час роботи газотурбінного агрегату спостерігаються високі тиски палива, масла та повітря, в зв'язку з чим існує небезпека руйнування апаратів, що знаходяться під тиском.

Специфікою роботи електростанції є те, що робочим тілом служить природний газ. Цей газ не має ні кольору ні запаху, тому важко встановити його наявність в приміщенні електростанції. Для виявлення газу, а також теплоносіїв, в газопровідні комунікації вводять сильнопахнучі речовини – адоранти. Гранично допустима концентрація газів в приміщенні електростанції не повинна перевищувати 0,05 мг/м<sup>3</sup> (ГОСТ 12.1.005- 88).

|                                                                                                                           |                                                                                      |  |  |  |  |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------|
| <div>Підпис і дата</div> <div>Інв. № дубл.</div> <div>Взам. інв. №</div> <div>Підпис і дата</div> <div>Інв. № подл.</div> |                                                                                      |  |  |  |  | <div>Арк.</div> <div>76</div> |
|                                                                                                                           | <div>Зм.</div> <div>Арк.</div> <div>№ докум.</div> <div>Підпис</div> <div>Дата</div> |  |  |  |  |                               |
|                                                                                                                           | <div>КР.142.6231м.03.03.ПЗ</div>                                                     |  |  |  |  |                               |
|                                                                                                                           |                                                                                      |  |  |  |  |                               |

### 3.2 Система пожежегасіння

Причини виникнення пожеж в приміщенні електростанції:

- несправність газоходів вихлопних колекторів;
- порушення правил збереження палива та масла;
- витоки палива та масла;
- несправність електропроводки і електрообладнання (коротке замикання,

пере навантаження та великі перехідні опори );

- недотримання графіка планового ремонту, знос і корозія обладнання;
- несправність запірної арматури і відсутність заглушок на апаратах та

трубопроводах, що ремонтуються або законсервовані.

Для попередження пожеж в машинному відділенні електростанції передбачені наступні заходи:

- організаційні - передбачають правильну експлуатацію обладнання, протипожежний інструктаж працюючих;

- технічні – це дотримання протипожежних правил та норм при устрою електропроводів та обладнання, опалення, вентиляції, освітлення, правильне розміщення обладнання; забезпечення надійного захисту електропроводки ізоляцією; легко запальні матеріали вкриваються вогнетривкою фарбою;

- режимного характеру – це заборона паління і відкритого вогню в машинному відділенні, в місцях, які для цього непризначені, здійснення зварювальних робіт в пожежонебезпечних приміщеннях;

- експлуатаційні – це своєчасні профілактичні огляди та ремонти обладнання.

Приміщення машинного відділення електростанції повинно бути оснащено протипожежною сигналізацією, системою пожежегасіння, а також вуглекислотними та пінними вогнегасниками і пожежним щитом. Для гасіння пожежі використовується вуглекислотна система пожежегасіння (рис.3.1).

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 77   |
|               |      |          |        |      |                       |      |

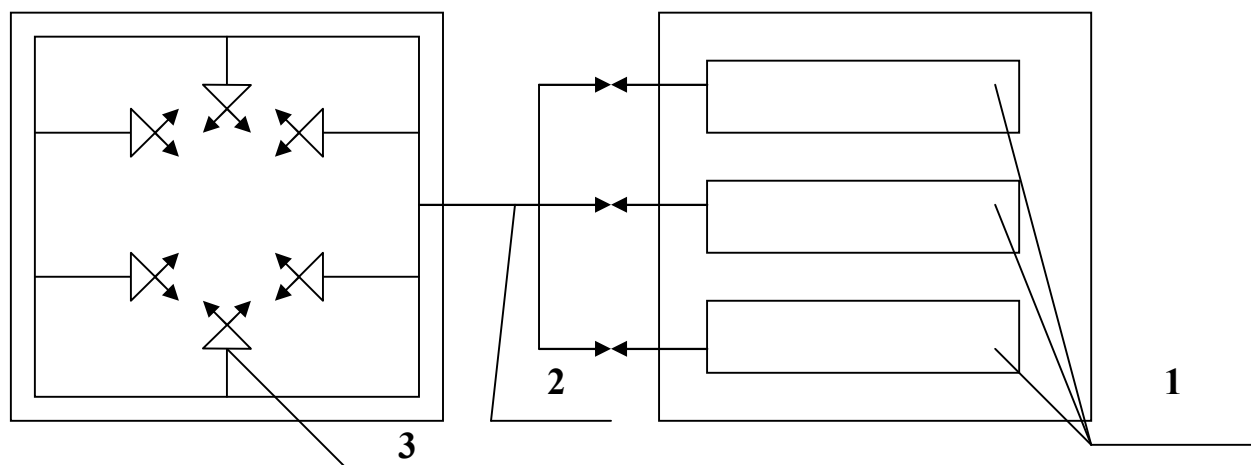


Рисунок 3.1 - Система вуглекислотного пожежогасіння  
1-балони; 2-трубопровід; 3-сопла

Вуглекислий газ потрапляє по трубопроводах в бокс, зменшуючи вміст кисню в повітряному середовищі і таким чином перешкоджає реакції горіння.

Ця схема призначена для гасіння пожеж в закритих приміщеннях. Перед впуском вуглекислого газу подається попереджувальний сигнал.

Трубопроводи системи зроблені з сталевих труб з антикорозійним покриттям. Газ знаходиться в рідкому стані з тиском 12,5 МПа. Балони з'єднано в батарею і розміщено в окремо відведеному приміщенні – станції вуглекислотного пожежогасіння.

### 3.3 Розрахунок системи вуглекислотного пожежогасіння

Приміщення електростанції відноситься до категорії Б (вибухонебезпечні, в котрих використовуються гази, нижня границя запалення котрих вище 10% за умови, що газ може утворювати вибухонебезпечну суміш в об'ємі, який перевищує 5% об'єму приміщення) і має III ступінь вогнестійкості.

Мета цього розрахунку – визначення необхідної кількості вуглекислого газу, внутрішніх діаметрів і товщини стінок трубопроводів, перевірка і визначення часу випуску вуглекислого газу по прийнятим трубопроводам. Розрахунок ведеться за методикою.

1. Визначається маса вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ :

$$G_p = 1,79V \cdot \varphi \text{ [кГ]}$$

де  $V$  – об'єм захищеного приміщення;

|               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |      |  |                       |      |
|---------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|--|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      | зміщено в окремо відведеному приміщенні – станції вуглекислотного пожежогасіння.                                                                                                                                                                                                         |        |      |  |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      | 3.3 Розрахунок системи вуглекислотного пожежогасіння                                                                                                                                                                                                                                     |        |      |  |                       |      |
| Взам. інв. №  |      | Приміщення електростанції відноситься до категорії Б (вибухонебезпечні, в котрих використовуються гази, нижня границя запалення котрих вище 10% за умови, що газ може утворювати вибухонебезпечну суміш в об’ємі, який перевищує 5% об’єму приміщення) і має III ступінь вогнестійкості. |        |      |  |                       |      |
| Підпис і дата |      | Мета цього розрахунку – визначення необхідної кількості вуглекислого газу, внутрішніх діаметрів і товщини стінок трубопроводів, перевірка і визначення часу випуску вуглекислого газу по прийнятим трубопроводам. Розрахунок ведеться за методикою.                                      |        |      |  |                       |      |
| Інв. № подл.  |      | 1. Визначається маса вуглекислого газу CO <sub>2</sub> :                                                                                                                                                                                                                                 |        |      |  |                       |      |
|               |      | $G_p = 1,79V \cdot \varphi \text{ [кг]}$                                                                                                                                                                                                                                                 |        |      |  |                       |      |
|               |      | де V – об’єм захищеного приміщення;                                                                                                                                                                                                                                                      |        |      |  |                       |      |
|               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |      |  | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |      |  |                       | 78   |
| Зм.           | Арк. | № докум.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Підпис | Дата |  |                       |      |
|               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |      |  |                       |      |

$\varphi$  - коефіцієнт, що визначає ступінь заповнення приміщення (для електростанції  $\varphi = 0,35$ ).

2. Кількість балонів:

$$n = G_p / G_6 ;$$

де  $G_6 = 25$  кг – маса вуглекислого газу в одному балоні.

3. Внутрішній діаметр магістралі трубопроводів захищаючих приміщень:

$$d_2 = d_0 \sqrt{n_2} \text{ [м];}$$

де  $n_2$  - розрахункова кількість одночасно випускаючих балонів;

$$d_0 = 0,01 \text{ м.}$$

4. Діаметр розширювального трубопроводу в захищаючих приміщеннях:

$$d_n^2 > d_2^2 + d_3^2 \text{ [м];}$$

де  $d_3 = 0,908$  м – еквівалентний діаметр;

5. Кількість сопел:

$$n_3 \leq 0,85 \cdot d_6^2 / d_s^2 ;$$

де  $d_6$  – внутрішній діаметр розподільного трубопроводу;

$d_s = 0,012$  м – умовний діаметр отвору сопла.

6. Час випуску вуглекислого газу по прийнятим трубопроводам:

$$T = 0,85 \cdot t \cdot \frac{n_2}{n_3} \cdot \frac{d_0^2}{d_s^2} \text{ [с];}$$

де  $t = 40$  с – час спорожнювання одного балону.

7. Перевірочний розрахунок товщини стінок:

Товщина стінки повинна бути не менш:

$$S = S_0 + b + c;$$

де  $S_0 = d \cdot P / (2G \cdot \varphi + P)$  - розрахункова товщина стінки;

$G = 10,5$  МПа – допустиме напруження;

$b = \frac{1}{25} \cdot \frac{d}{R} S_0$  - коефіцієнт, враховуючий зміну товщини труб при

згинанні;  $c = 0,3$  мм (прийнято) – припуск на корозію.

Розрахунки зведено до таблиці 3.3

|             |               |              |              |               |     |      |          |        |      |                       |      |
|-------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Ив. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|             |               |              |              |               |     |      |          |        |      |                       | 79   |
|             |               |              |              |               |     |      |          |        |      |                       |      |

Таблиця 3.3 - Розрахунок системи вуглекислотного пожежогасіння

| Назва приміщення | Об'єм приміщення $V, \text{м}^3$ | Коефіцієнт $\varphi$ | Кількість вуглекислого газу |          | Кількість балонів $n, \text{шт.}$ | Діаметр магістралі $d_2, \text{м}$ | Діаметр трубопроводів $d_{\text{в}}, \text{м}$ | Кількість сопел $n_3, \text{шт.}$ | Час випуску $T, \text{с}$ |
|------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Блок ГТА         | 300                              | 0,35                 | Розрахункове                | Прийняте | 8                                 | 0,85                               | 0,028                                          | 5                                 | 78,34                     |
|                  |                                  |                      | 187,9                       | 200      |                                   |                                    |                                                |                                   |                           |

Продовження розрахунку наведено в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 - Розрахунок системи вуглекислотного пожежогасіння

| №  | Назва величини                            | Позначення | Умовний прохід |       |
|----|-------------------------------------------|------------|----------------|-------|
|    |                                           |            | 90             | 30    |
| 1. | Зовнішній діаметр, мм                     | $d$        | 100            | 34    |
| 2. | Розрахунковий тиск, МПа                   | $P$        | 12,5           | 5     |
| 3. | Розрахункова товщина стінки, мм           | $S_0$      | 6,04           | 1,5   |
| 4. | Коефіцієнт, враховуючий утоньшення стінки | $b$        | 0,967          | 0,240 |
| 5. | Припуск на корозію, мм                    | $c$        | 0,3            | 0,3   |
| 6. | Найменш допустима товщина по ГОСТу, мм    | $S_p$      | 7,0            | 2,0   |
| 7. | Приймаєма товщина стінки, мм              | $S_n$      | 8,5            | 8,5   |
| 8. | Зовнішній діаметр, мм                     | $d_n$      | 98,5           | 35    |

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дубл.  |  |
| Взам. інв. №  |  |
| Підпис і дата |  |
| Інв. № подл.  |  |

|     |      |          |        |      |                       |      |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                       | 80   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 3.4 Розробка заходів щодо зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів

Так як в приміщенні електростанції підвищена температура робочої зони, то для оздоровлення повітряного середовища використовують вентиляцію, котра видаляє нагріте повітря з приміщення і подає в нього свіже; застосовують дистанційне керування при роботі обладнання. Велике значення для оздоровлення повітряного середовища має надійна герметизація обладнання, зокрема, газопроводів, насосів, компресорів.

Для зниження рівня шуму газотурбінного агрегату застосовують наступні заходи:

- замінюють, коли це можливо, підшипники кочення на підшипники ковзання, це знижує шум на (10 – 14) дБ;
- при виборі металу для виготовлення деталей необхідно враховувати, що внутрішнє тертя в різних металах не однакове, хромування турбінних лопаток зменшує їх звучність;
- застосування примусового змащування тертьових поверхонь в зчленуваннях;
- застосування балансування обертючих елементів;
- використовувати прокладочні матеріали та пружні вставки в з'єднаннях;
- зменшення шуму на шляху його розповсюдження за рахунок використання звукоізолюючих огорожень і кожухів, екранів і кабін;
- акустична обробка приміщень;
- зміна напрямку випромінювання шуму, наприклад, отвір повітрязаборної шахти треба бути розташувати так, щоб максимум випромінювального шуму було направлено в протилежну сторону від робочих місць.

Для зменшення шуму, що виникає при роботі газотурбінного двигуна, використовують звукопоглинання і звукоізолюючі матеріали в різних шумоподавляючих пристроях, а також шляхом вдосконалення обладнання (покращення аеродинамічних характеристик міцної частини двигуна).

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.03.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 81   |
|               |      |          |        |      |                       |      |



Розглянемо більш детально заходи щодо зниження шуму в кожному із перерахованих джерел. Найбільш сильне джерело шуму – це повітрязабірний пристрій. Для зниження рівня шуму використовують акустичну обробку вхідного та вихідного патрубків (покриття зсередини звукопоглинаючим матеріалом), що дозволяє знизити рівень шуму до 10 дБ; встановлюють в трактах забору повітря і зкидання димових газів глушники.

Для зниження шуму корпусу турбоагрегату використовують суцільний герметичний звукоізолюючий кожух та облицювання приміщення електростанції звукоізолюючим матеріалом.

Для зменшення шуму нагнітача природного газу використовують покриття звукопоглинаючим матеріалом патрубків, корпусу, кришки.

Для виключення передачі шуму на раму – маслобак використовують амортизаційні прокладки.

Для боротьби з вібрацією використовують наступні заходи:

вібродемпфування та віброізоляція. Так за допомогою вібродемпфування, енергія механічних коливань перетворюється в теплову енергію. Вібродемпфування використовується для зниження вібрацій, які визвані коливаннями металевих поверхонь. Встановлення віброізоляторів дозволяє послабити передачу коливань від джерела коливань до суміжних елементів.

Для зниження вібрації в приміщенні електростанції, турбокомпресорний блок встановлюють на фундамент, який не пов'язаний з фундаментом будівлі (ГОСТ 12.1.012. – 90).

Для виключення можливості руйнування апаратів, котрі знаходяться під тиском, на них встановлюють аварійні клапани, котрі при спрацьовуванні знижують тиск, запобігаючи тим самим їх руйнування.

Так як газотурбінний агрегат встановлено в індивідуальному боксі, то в приміщенні відсутнє природне освітлення. Для забезпечення роботи станції необхідно розробити систему штучного освітлення (норма освітленості в приміщенні компресорної станції згідно нормативним документам – 150 лю).

|              |               |          |        |      |                                                                             |
|--------------|---------------|----------|--------|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ивв. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |                                                                             |
|              | Ивв. № дубл.  |          |        |      |                                                                             |
|              | Взам. ивв. №  |          |        |      |                                                                             |
|              | Підпис і дата |          |        |      |                                                                             |
| Зм.          | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | <div> <div>КР.142.6231м.03.03.ПЗ</div> <div>Арк.</div> <div>82</div> </div> |

[illegible]

#### 4 Охорона навколишнього середовища

Людство постійно пов'язано з навколишнім середовищем. З його “кладової” люди черпали для свого існування біологічні і мінеральні ресурси. Це відбувалося на протязі багатьох століть і не завжди люди замислювались над цим, людство поставило себе перед межею, перспектив за котрою нема. Навколишнє середовище забруднене до такої ступені, що в найближчий час може постати питання про наше виживання, бо на цей час Україна займає перше місце в Європі за кількістю “технічного бруду” на одиницю населення, в нашій країні найнижчий показник тривалості життя ( в середньому 65 років ). Зоною екологічного лиха вважається біля 15% території нашої держави.

Навколишнє середовище – це фізичне середовище проживання людини, рослинного і тваринного світу та мікроорганізмів. Воно включає в себе природу і продукти антропогенної діяльності, котрі мають великий вплив на біосферу Землі.

По мірі прискорення темпів науковоо-технічного прогресу вплив людей на природу стає все більшим. Зараз охорона навколишнього середовища являє собою планову систему державних, міжнародних і суспільних заходів, які направлені на раціональне використання, захист та відновлення природних ресурсів навколишнього середовища від забруднення і руйнування, на створення оптимальних умов існування людського суспільства.

Охорона навколишнього середовища включає в себе широке коло проблем: забруднення води і повітря шкідливими промисловими викидами, продуктами життєдіяльності людини, отруйними хімічними і радіоактивними речовинами тощо.

##### 4.1 Забруднення навколишнього середовища шкідливими викидами газотурбінного агрегату електростанції

До забруднень навколишнього середовища прийнято включати всі фактори, які негативно впливають на людину і всю живу природу, на об'єкти неживої природи, на природні ресурси.

З сторони газотурбінної установки найбільш значними факторами, що впливають на навколишнє середовище є викиди тепла і шкідливих речовин в атмосферу, в яких присутні: продукти повного згорання оксидів азоту (IV)  $\text{NO}_2$  і оксидів сірки

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.04.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 84   |
|               |      |          |        |      |                       |      |

(IV)  $\text{SO}_2$ ; продукти неповного згорання  $\text{C}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ; оксиди азоту  $\text{NO}_x$ , двооксид азоту  $\text{NO}_2$ ; золіві частки. Наслідки забруднення біосфери тепловими викидами призведе до виникнення на Землі “парникового ефекту”. З кожним роком кількість теплових і шкідливих викидів зростає, тому діючими санітарно-гігієнічними нормами встановлено середньодобові граничнодопустимі концентрації компонентів в атмосферному повітрі населених пунктів:  $\text{CO}=1\text{мг/м}^3$ ; вуглеводні  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}=2,5\text{ мг/м}^3$ ;  $\text{NO}_x=0,085\text{ мг/м}^3$ . Граничнодопустимі концентрації в повітрі робочої зони приведені в ГОСТ 12.1.005-88 і регламентовано санітарними нормами.

В газотурбінній установці значна частина тепла (50-60)% викидається в атмосферу з теплом відпрацьованих газів, тобто у вигляді вторинних енергоресурсів.

Існує декілька напрямків використання вторинних енергоресурсів газотурбінної установки:

1. Для теплозабезпечення у вигляді гарячої води або повітря та використання для обігріву і вентиляції, як приміщення самої електростанції, так і житлових приміщень і службових приміщень, селища обслуговуючого персоналу, теплично-овочевих комбінатів тощо.

2. Отримання додаткової кількості електроенергії за рахунок утилізації вторинних енергоресурсів в парогазовому циклі дає можливість для задоволення власних потреб станції в електриці, наприклад, для приводу водяних насосів, систем тепло забезпечення і вентиляції, освітлення, а при необхідності, тимчасового обігріву робочих місць персоналу, а також електрозабезпечення зовнішніх потреб.

3. Холод, який отримується внаслідок використання енергії вторинних енергоресурсів можна застосовувати для охолодження газу, що транспортується або для зниження температури повітря в циклі газотурбінної установки.

4. Для отримання пари і додаткової потужності використовується тепло-утилізаційний контур, який знижує теплові і шкідливі викиди в атмосферу і одночасно являє собою глушник та іскрогасник.

Ще одним фактором забруднення атмосфери являються вихлопні гази газотурбінної установки. Їх токсичність залежить, головним чином, від сорту палива, що використовується.

|                                                                                                                            |     |      |          |        |      |                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|----------|--------|------|----------------------------------------------------------------|
| <div>Инов. № подл.</div> <div>Підпис і дата</div> <div>Взам. инв. №</div> <div>Инв. № дубл.</div> <div>Підпис і дата</div> |     |      |          |        |      | <div>КР.142.6231м.03.04.ПЗ</div> <div>Арк.</div> <div>85</div> |
|                                                                                                                            |     |      |          |        |      |                                                                |
|                                                                                                                            |     |      |          |        |      |                                                                |
|                                                                                                                            | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                                                |

В вихлопних газах знаходиться біля 200 компонентів, котрі можна поділити на шість груп:

- продукти повного згорання палива, котрі сприяють виникненню кислотних дощів і “парникового ефекту”;  $\text{SO}_2$  – впливає на верхні дихальні шляхи, викликаючи здавлення і руйнуючі дії, а також призводить до утворення сірчаної кислоти;
- окис вуглецю (II)  $\text{CO}$ , з’єднуючись з гемоглобіном крові, зменшує її здатність переносити кисень, а також негативно впливає на центральну нервову систему людини та тварин;
- оксиди азоту (II) і (IV)  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  сприяють утворенню азотної і азотистої кислот, котрі роз’їдають слизисті оболонки, руйнують м’язову тканину, викликають незворотні перетворення серцево-судинної системи;
- продукти неповного згорання – вуглеводні  $\text{C}_x\text{H}_y$  впливають на систему кровообігу і на умовно-рефлекторну діяльність людини, електричну активність мозку та світову чутливість очей, призводять до онкозахворювань;
- альдегіди та формальдегіди мають алергенний вплив;
- сажа.

#### 4.2 Розробка заходів щодо зменшення шкідливих викидів газотурбінних установок електростанцій

На цей час в стаціонарних установках використовують, в якості палива, природний газ і спостерігаються високі температури газу перед турбіною високого тиску.

1. Заходи по зниженню емісій  $\text{CO}$  і  $\text{C}_x\text{H}_y$  зводяться до підтримання в реакційному об’єму достатньо високого температурного рівня. З точки зору зменшення емісій продуктів не згорання палива перевага надається камерам згорання з дифузійним методом сумішоутворення, котрі підтримують стабільний температурний рівень в зоні реакції. Цей метод вимагає інтенсифікації перемішування палива з повітрям. Для покращення процесу сумішоутворення використовують багатоступінчасті та багатосоплові форсунки, котрі працюють на перепаді тиску повітря у фронтівому пристрої камери згорання, застосовують пневматичний розпил палива.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |               |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--|--|--|--|
| Ивв. № подл.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Підпис і дата |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Ивв. № дубл.  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Взам. ивв. №  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Підпис і дата |  |  |  |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div> <div>Зм.</div> <div>Арк.</div> <div>№ докум.</div> <div>Підпис</div> <div>Дата</div> </div> <div style="text-align: center; flex-grow: 1;"> <div>КР.142.6231м.03.04.ПЗ</div> <div>86</div> </div> <div> <div>Арк.</div> <div>86</div> </div> </div> |               |  |  |  |  |

2. Заходи щодо зменшення шкідливих речовин в викидах газотурбінної установки зводяться до раціоналізації аеродинаміки камери згорання і паливо подачі; зменшення об'ємів перезбагачених паливом високотемпературних зон; гомогенізації горючої суміші в камері згорання за рахунок заміни механічних форсунок повітряно-механічними і використання випарювальних камер згорання; сорту палива і застосування спеціальних домішок марганцю, котрі зменшують димлення на (50 – 90)% , барія, 0,3% міді призводить до зменшення вмісту  $\text{NO}_x$  на (15 – 20)% .До методів хімічної очистки відпрацьованих газів відноситься використання нейтралізаторів, котрі захоплюють сажу, частини палива, масла і токсичних речовин.

3. До основних способів зменшення емісії оксидів азоту  $\text{NO}_x$  відносять:

- підвищення якості розпилювання палива і інтенсифікація процесів сумішоутворення. Це досягається за рахунок використання багатогорілочного фронтального пристрою в камері згорання, що зменшує час перебування газу в зоні високих температур і інтенсифікує масообмінні процеси в камері згорання;
- збільшення коефіцієнту надлишку первинного повітря;
- інтенсифікація відводу теплоти. Для виконання цієї мети необхідно розмістити в камері згорання теплообмінні поверхні парогенераторів або теплові труби;
- використання інертних домішок . Цей засіб передбачає зовнішню циркуляцію продуктів згорання , де вони охолоджуються і подаються до камери згорання;
- подача до зони горіння води або водяної пари. Так як теплоємність водяної пари в двічі більша за теплоємність повітря, тому подача водяної пари дає значне зниження температури, що призведе до зменшення викидів  $\text{NO}_x$  ;
- використання водно-паливних емульсій. Подача емульсії, в якій зберігається води (10-15)%, зменшує концентрацію  $\text{NO}_x$  на (20-30)%;
- модифікація палив і використання спеціальних присадок. Спостерігається робота газотурбінного двигуна на спиртах, метанолі  $\text{CH}_3\text{OH}$ , вуглецю, етанолі  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Ефективними є розчинені аргонOMETалеві з'єднання, котрі входять в якості присадок на основі кобальту, міді, марганцю.

|             |               |          |        |      |  |                                                     |
|-------------|---------------|----------|--------|------|--|-----------------------------------------------------|
| Ив. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |  | <div>КР.142.6231м.03.04.ПЗ</div> <div>Арк. 87</div> |
|             | Взам. ів. №   |          |        |      |  |                                                     |
|             | Ив. № дубл.   |          |        |      |  |                                                     |
|             | Підпис і дата |          |        |      |  |                                                     |
| Зм.         | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата |  |                                                     |

При розробці нових газотурбінних двигунів проблемі емісій шкідливих речовин приділяється особлива увага, а у старих типів двигунів вміст шкідливих речовин в продуктах згорання дуже високий і не відповідає постійно зростаючим обмеженням по їх вмісту, що не дає можливості виходу на зовнішній ринок з цією продукцією. Тому для зниження викидів шкідливих речовин необхідно проводити модернізацію таких двигунів.

Існує декілька способів досягнення цієї мети, більшість з них не потребує значних змін конструкції камери згорання, системи палива та системи управління агрегатом.

В основу екологічної модернізації камер згорання двигуна покладено зміна процесу горіння в жаровій трубі. Ця зміна повинна бути виконана в двох напрямках:

- зниження температури факелу в первинній зоні жарової труби;
- зменшення часу перебування газів в зоні високих температур.

Поставлені задачі екологічної досконалості камер згорання вирішуються за рахунок об'єднання паливо-повітряної суміші в зоні горіння і роздроблення факелу на складові частини. Це дозволяє зменшити температуру факелу в первинній зоні жарової труби та зменшити час перебування газів в зоні високих температур.

Подальша модернізація передбачає: додатково до об'єднання паливо-повітряної суміші, введення попереднього змішування палива з повітрям поза зоною горіння. Газ подається крізь отвори і змішується з повітрям в між лопатковому каналі.

Ефективним методом зниження СО є також заміна плівкового охолодження жарових труб на конвективне.

|              |               |          |        |      |                                                |
|--------------|---------------|----------|--------|------|------------------------------------------------|
| Ивв. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |                                                |
|              | Инв. № дубл.  |          |        |      |                                                |
|              | Взам. инв. №  |          |        |      |                                                |
|              | Підпис і дата |          |        |      |                                                |
| Зм.          | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | <div>КР.142.6231м.03.04.ПЗ</div> <div>88</div> |
|              |               |          |        |      |                                                |

|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|--------------|---------------|------------------|----------|--------|------|--------------|--------------|---------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              | Зм.           | Лист             | № докум. | Підпис | Дата |              |              |               |
|              | Студент.      | Костріков В.А.   |          |        |      |              |              |               |
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              | Зм.           | Лист             | № докум. | Підпис | Дата |              |              |               |
|              | Керівник      | Козловський А.В. |          |        |      |              |              |               |
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              | Зм.           | Лист             | № докум. | Підпис | Дата |              |              |               |
|              | Консульт.     |                  |          |        |      |              |              |               |
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              | Зм.           | Лист             | № докум. | Підпис | Дата |              |              |               |
|              | Зав.кафедр    | Патлайчук В.М.   |          |        |      |              |              |               |
| Інв. № подл. | Підпис і дата |                  |          |        |      | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |
|              | Зм.           | Лист             | № докум. | Підпис | Дата |              |              |               |
|              |               |                  |          |        |      |              |              |               |



## 5.1 Мета та основні завдання цивільного захисту

Цивільний захист України є державною системою органів управління, сил і засобів, що створюється для організації і забезпечення захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного, екологічного, природного та воєнного характеру.

Цивільний захист – це система організаційних, інженерно-технічних, санітарно-гігієнічних, протиепідемічних та інших заходів, які здійснюються центральними та місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування, підпорядкованими їм силами і засобами, підприємствами, установами та організаціями незалежно від форми власності, добровільними рятувальними формуваннями, що забезпечують виконання цих заходів з метою запобігання та ліквідації НС, які загрожують життю та здоров'ю людей, завдають матеріальних збитків у мирний час і в особливий період.

З метою забезпечення реалізації державної політики у сфері цивільного захисту населення і територій від НС в Україні відповідно до Закону "Про захист населення і територій від НС техногенного та природного характеру" створена Єдина державна система цивільного захисту населення і територій (ЄДС ЦЗ) - сукупність органів управління, сил та засобів центральних і місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, на які покладається реалізація державної політики у сфері ЦЗ. Вона є складовою національної безпеки, а виконання її завдань – важливим обов'язком органів виконавчої влади всіх рівнів. Структуру ЄДС ЦЗ становлять центральні та місцеві органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування і створювані ними функціональні та територіальні підсистеми ЄДС ЦЗ (як складові частини ЄДС).

Державними органами управління у сфері захисту населення та територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру є:

- Кабінет Міністрів України;

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 90   |

- спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади, до компетенції якого віднесено питання захисту населення і територій від НС техногенного та природного характеру;

- інші спеціально уповноважені центральні органи виконавчої влади;

- місцеві органи виконавчої влади в межах повноважень, визначених законом;

- органи місцевого самоврядування в межах повноважень, визначених законом.

Основною метою створення єдиної державної системи є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, цивільного захисту населення.

Завданнями єдиної державної системи є:

- розроблення нормативно-правових актів, а також норм, правил та стандартів з питань запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення захисту населення і територій від їх наслідків;

- забезпечення готовності центральних та місцевих органів виконавчої влади, виконавчих органів рад, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;

- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;

- навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;

- виконання цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;

- збирання і аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;

- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 91   |
|               |      |          |        |      |                       |      |

- створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- проведення державної експертизи, забезпечення нагляду за дотриманням вимог щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій (у межах повноважень центральних та місцевих органів виконавчої влади);
- оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне його інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи;
- захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
- пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;
- здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення, проведення гуманітарних акцій;
- реалізація визначених законодавством прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), що брали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
- участь у міжнародному співробітництві у сфері цивільного захисту населення.

#### *Надзвичайні ситуації в Україні та їх класифікація*

*Надзвичайна ситуація* - порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Надзвичайні ситуації класифікують за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат і матеріальних збитків.

|             |               |          |        |      |                             |      |
|-------------|---------------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
| Ив. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |                             | Арк. |
|             | Взам. инв. №  |          |        |      |                             |      |
|             | Инв. № дубл.  |          |        |      |                             |      |
|             | Підпис і дата |          |        |      |                             |      |
| Зм.         | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ<br>92 |      |

Види надзвичайних ситуацій (залежно від характеру походження, що можуть зумовити виникнення НС на території України): техногенного, природного, соціального та воєнного характерів.

*Надзвичайна ситуація техногенного характеру* – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті внаслідок транспортної аварії (катастрофи) пожежі, вибуху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних та біологічно небезпечних речовин, руйнування споруд тощо.

*Надзвичайна ситуація природного характеру* – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті, пов’язане з небезпечним геофізичним, геологічним чи гідрологічним явищем, деградацією ґрунтів чи надр, пожежею у природних екологічних системах, зміною стану повітряного басейну, інфекційною захворюваністю та отруєнням людей, інфекційним захворюванням свійських тварин, масовою загибеллю диких тварин, ураженням сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками тощо.

*Надзвичайна ситуація соціального характеру* – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті спричинене протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування, або пов’язане із зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо.

*Надзвичайна ситуація воєнного характеру* – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті спричинене застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження населення, що визначаються окремими нормативними документами.

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 93   |

## 5.2 Обґрунтування необхідності дослідження стійкості об'єктів господарської діяльності

Під стійкістю об'єкту господарської діяльності (ОГД) розуміють можливість виконувати свої функції (випускати продукцію, надавати послуги тощо) в умовах надзвичайних ситуацій, а також пристосованість даного об'єкта до швидкого відновлення після пошкодження.

Зниження рівня ризику виникнення НС техногенно-екологічного характеру на об'єктах господарської діяльності досягається завчасним проведенням організаційних, інженерно-технічних та інших заходів. Ці заходи плануються і здійснюються начальником цивільної оборони об'єкта.

Заходи, що здійснюються для зменшення ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій:

- систематичні перевірки посадовими особами району (об'єкта) і державними інспекторами стану будинків, споруд, технологічного обладнання, електрогосподарства, газо- і нафтопроводів, теплових трас;
- перевірка утримання та готовності системи виявлення витоків НХР, оповіщення працюючого персоналу і населення;
- перевірка ефективності вентиляційних, в тому числі і аварійних, систем, надійності герметизації ємностей, які працюють під тиском;
- перевірка працездатності контрольно-вимірювальної, захисної та блокувальної апаратури;
- створення безпечних умов праці для виробничого персоналу;
- Забезпечення працюючого персоналу правилами, стандартами, нормами, інструкціями та іншими нормативними документами з техніки безпеки та охорони праці;
- здійснення профілактичних протипожежних заходів;
- контроль за справністю пожежного зв'язку, сигналізації, початкових засобів пожежогасіння, стану шляхів і під'їздів до об'єктів, справністю джерел протипожежного водопостачання;

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 94   |
|               |      |          |        |      |                       |      |

- підготовка фонду захисних споруд, створення запасів засобів індивідуального захисту;
- нанесення на виробниче обладнання і комунікацію розпізнавальних знаків безпеки відповідно до вимог;
- перевірка відповідності технологічних процесів машин, механізмів, обладнання вимогам нормативних документів щодо безаварійної експлуатації, техніки безпеки та охорони праці;
- розробка і вдосконалення системи планів попереджувальних оглядів та ремонтів техніки;
- розробка і впровадження формулярів на кожний агрегат для відображення технічного стану обладнання з метою вдосконалення профілактичних заходів;
- розробка планів ліквідації аварійних ситуацій.

Закон **"Про цивільну оборону України"** гарантує громадянам України право на захист свого життя і здоров'я від наслідків аварій, катастроф, значних пожеж, стихійного лиха. Держава, як гарант цього права, створила систему цивільної оборони (ЦО), основною метою якої є захист населення від небезпечних наслідків надзвичайних ситуацій, що можуть виникнути як у мирний так і у воєнний час.

Згідно **статті 2** Закону "Про цивільну оборону України" завданням Цивільної оборони України є: запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження і запровадження заходів щодо зменшення збитків та втрат у разі аварій, катастроф, вибухів, великих пожеж та стихійного лиха.

Стійка робота об'єктів досягається:

- підвищенням надійності роботи та створенням дублюючих джерел енерго-, газо- та водопостачання, а також створенням запасів сировини, палива, комплектуючих деталей, обладнання та матеріалів;
- вдосконаленням технологічних процесів виробництва, забезпеченням автоматичного відключення при виході з ладу установок;
- будівництвом та обладнанням сховищ на підприємствах для робітників та службовців (для цього можуть бути використані шахти та інші виробітки);

|               |               |          |        |      |                       |      |    |
|---------------|---------------|----------|--------|------|-----------------------|------|----|
| Инов. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |                       | Арк. |    |
|               | Взам. инв. №  |          |        |      |                       |      |    |
|               | Инв. № дубл.  |          |        |      |                       |      |    |
|               | Підпис і дата |          |        |      |                       |      |    |
| Зм.           | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ |      | 95 |

- підготовкою в заміській зоні баз для розміщення науково-дослідних, конструкторських відділів та інших невиробничих підрозділів об'єкта;
- створенням на об'єктах захисних споруд для пунктів керування;
- постійною готовністю аварійно-рятувальних формувань до проведення рятувальних та невідкладних аварійних робіт;
- проведенням організаційних та інженерно-технічних заходів щодо підготовки об'єкта до особливого режиму роботи.

### 5.3 Аналіз видів, наслідків і критичності відмов (АВНKB) при функціонуванні електростанції

Згідно міждержавному стандарту “Аналіз видів, наслідків і критичності відмов” (УДК 62-192.001 від 01.01.1997), який встановлює порядок проведення та загальні методичні принципи аналізу видів, наслідків та критичності відмов:

*Аналіз видів, наслідків і критичності відмов (АВНKB)* - формалізована, контрольована процедура якісного аналізу проекту, технології виготовлення, правил експлуатації і зберігання, системи технічного обслуговування та ремонту виробу, що полягає у виготовленні на деякому рівні розширення його структури можливих відмов різного виду, а також простежуванні причинно-наслідкових зв'язків, що обумовлюють їх виникнення, і можливих (спостерігаємих) наслідків цих відмов на даному і вищестоящому рівнях, а також у якісній оцінці і ранжируванні відмов за рівнем важливості їх наслідків.

АВНKB проводять з метою обґрунтування, перевірки достатності, оцінки ефективності і контролю за реалізацією керуючих рішень, що направлені на вдосконалення конструкцій, технологій виготовлення правил експлуатації, системи технічного обслуговування в ремонті об'єкту і забезпечуючих попередження виникнення та/або послаблення вагомості можливих наслідків його відмов, досягнення характеристик безпеки, екологічності, ефективності та надійності. Необхідність проведення АВНKB полягає в тому, що кількість аварій, котрі трапляються останнім часом на Україні, зростає внаслідок морального та фізичного старіння обладнання та техно-

|             |               |          |        |      |                                  |
|-------------|---------------|----------|--------|------|----------------------------------|
| Ив. № подл. | Підпис і дата |          |        |      |                                  |
|             | Ив. № дубл.   |          |        |      |                                  |
|             | Взам. ив. №   |          |        |      |                                  |
|             | Підпис і дата |          |        |      |                                  |
| Зм.         | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ<br>Арк. 96 |

логій виготовлення цього обладнання. Необхідність проведення АВНКВ конкретного об'єкту визначають за домовленістю зацікавлених сторін при вироблені вимог до програми забезпечення його надійності, що включається у контрактні документи (технічне завдання, договір та інше).

Рекомендується передбачувати проведення АВНКВ для таких об'єктів:

- у яких можливі відмови, що є загрозою щодо безпеки людини, небезпечного забруднення навколишньої середовища, значної економічної або іншої шкоди;
- пряме експериментальне підтвердження відповідності яких встановленим вимогам безпеки й надійності технічно неможливо або економічно недоцільно і проводиться розрахунками або розрахунково-експериментальними методами.

Проведення АВНКВ повинно бути обов'язковим у випадку коли відсутні вихідні дані для застосування інших методів аналізу надійності об'єкту (розрахункових та інших) або їх об'єм та/або достовірність на періоді життєвого циклу, який розглядається, об'єкту визнані недостатніми.

У даному випадку, виходячи з вищезазначеного, для машинного відділення корабля необхідно провести або аналіз відмов і їх наслідків, або дослідження надійності комплектуючого обладнання.

### Характеристика дослідного об'єкту

Газотурбінна Установка ГТУ потужністю 60 МВт яка має блоковану схему (однокаскадну). Двигун призначений для обертання редуктора за допомогою валопроводу зі сторони компресора. Після редуктора знижується число оборотів до 3000 об/хв. Після чого двигун працює на електрогенератор який виробляє електроенергію. Частота обертання ротора силової турбіни генератора складає 4387 об/хв.

Газотурбінна установка є небезпечним виробничим об'єктом, на якому можуть виникнути небезпечні події (руйнування підшипників редуктора; прорив газопроводу, що підводить газ; замикання генератора; розрив трубопроводу з парою; надмірна вібрація у турбіні; розрив кожуху двигуна. і т.п.).

При експлуатації ГТУ особливу увагу необхідно звернути на:

- виникнення сильної вібрації, що свідчить про ушкодження проточної частини, прогину ротора, вильоту лопаток;

|                                                                                                                           |                                                                                      |  |  |  |  |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------|
| <div>Підпис і дата</div> <div>Инв. № дубл.</div> <div>Взам. инв. №</div> <div>Підпис і дата</div> <div>Инв. № подл.</div> |                                                                                      |  |  |  |  | <div>Арк.</div> <div>97</div> |
|                                                                                                                           | <div>Зм.</div> <div>Арк.</div> <div>№ докум.</div> <div>Підпис</div> <div>Дата</div> |  |  |  |  |                               |
|                                                                                                                           |                                                                                      |  |  |  |  |                               |
|                                                                                                                           |                                                                                      |  |  |  |  |                               |
| <div>КР.142.6231м.03.05.ПЗ</div>                                                                                          |                                                                                      |  |  |  |  |                               |



- поява диму з підшипника турбіни й генератора (підвищення температури підшипників до 75°C небезпечно);
- зниження рівня масла в баку нижче граничного;
- осьове зрушення турбіни вище граничного;
- зниження вакууму до аварійного значення й надмірне нагрівання вихлопної частини турбіни.

Мірами забезпечення безпеки є заходи попередження аварій. Для якісного аналізу небезпеки застосовується вищезазначений Міждержавний стандарт надійності в техніці «Аналіз видів, наслідків і критичності відмов». При цьому розглядається кожний апарат ГТУ (редуктор, кожух двигуна, газопровід турбіни, електрогенератор, турбіна, трубопровід.) на предмет того, як він став несправним (вид і причина відмови) і який буде вплив відмови на технічну систему.

### 5.3.1 Характеристика комбінованої паро газової установки

Відповідно до проектного завдання була розроблена ГТУ, признача для використання на електростанціях. Питома потужність 631.49 кВт/(кг/с), ефективний ККД 0,4883.

Потужність ГТД 60000 кВт, яка подається на генератор. Повітря з атмосфери стискується в компресорі, і надходить у КЗ, де змішується з перегрітою парою, вироблюваною УПГ, і продуктами згоряння палива. Потім отримана парогазова суміш надходить по трубопроводу у турбіну, що виробляє корисну потужність. Схема виконана по замкнутому контуру, тобто пара працює по замкнутому циклі, а газ - по відкритому. Відпрацьована в турбіні парогазова суміш надходить в УПГ, де тепло передається пару в пароперегрівнику (ПП), воді - в економайзері (ЕК) і випарному пучку (ВП). Вода в ЕК попередньо підігрівається, а потім у ВП нагрівається до температури насичення. Після ВП вода і пара надходять у сепаратор де змішуються з водою, що надійшла з теплового ящика. Пара подається в ПП, після ПП пар надходить у КЗ. З УПГ парогазова суміш надходить у парогазовий конденсатор, де вона охолоджується. Пара, що

|             |               |          |        |      |                       |    |
|-------------|---------------|----------|--------|------|-----------------------|----|
| Ив. № подл. | Підпис і дата |          |        |      | Арк.                  |    |
|             | Инв. № дубл.  |          |        |      |                       |    |
|             | Взам. инв. №  |          |        |      |                       |    |
|             | Підпис і дата |          |        |      |                       |    |
| Зм.         | Арк.          | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | 98 |

| Инв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Инв. № дубл. | Підпис і дата |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|

Камера згоряння двигуна розміщена над останніми ступенями компресора, що скорочує осьовий габарит двигуна і збільшує запас по критичних оборотах ротора, довжина якого також зменшується. По конструктивному виконанню камера згоряє є трубчасто-кільцевою з числом жарових труб 20. По схемі перебігу КС протікова. Витрата повітря через КС 93.111 кг/с; годинна витрата палива 8833.9 кг/год.

### 5.3.2 Визначення наслідків відмов елементів системи ГТУ

1. У відповідності з планом аналізу встановлюють мінімальний рівень розукрупнення, з якого починають АВНКВ.
2. На основі функціональної блок - схеми об'єкту ідентифікують всі елементи обраного рівня розукрупнення.
3. Для кожного ідентифікованого елементу даного рівня на основі класифікаторів відмов що є, інженерного аналізу, апріорних даних, досвіду й знань дослідника складають перелік можливих видів відмов даного елементу.
4. Для кожного виду відмов обраного елемента визначають його можливі наслідки на розглядаємому й наступних рівнях структури об'єкту.
5. Для елементів, відмови яких зазначеного виду безпосередньо при водять

до відмов об'єкту або зниженню якості його функціонування, оцінюють категорію важкості наслідків відмов.

6. Повторюють описані вище операції послідовного для елементів всіх вищестоящих рівнів розукрупнення. Наслідки відмов елементів нижчестоящого рівня, які не можуть бути виражені у вигляді впливу на функціонування елементів розглядаємого рівня, розглядають як самостійні види відмов на цьому рівні.

7. Виділяють відмови, категорія важкості наслідків або оцінки показників критичності яких перевищують межі, що встановлені планом аналізу, а елементи, відповідні цим відмовам, включають у перелік критичних елементів.

За структурним методом визначаємо наслідки, до яких призводять відмови визначених елементів системи ГТУ, заповнюємо робочий лист для проведення АВ-НКВ (табл. 5.1).

Критичність відмови  $C$  розраховують за формулою:

$$C = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3,$$

де  $B_1, B_2, B_3$  обираються з відповідних оціночних таблиць.

Таблиця 5.1 - Оцінки можливості відмов у балах

| Види відмов по можливості виникнення за час експлуатації      | Очікувана можливість відмов, оцінена експериментальним шляхом | Оцінка можливості відмови у балах $B_1$ |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Відмова практично не можлива                                  | Менше 0,00005                                                 | 1                                       |
| Відмова мало вірогідна                                        | Від 0,00005 до 0,001                                          | 2                                       |
| Відмова має малу вірогідність, обумовлену точністю розрахунку | Від 0,001 до 0,005                                            | 3                                       |
| Умірена можливість відмови                                    | Від 0,005 до 0,01                                             | 4                                       |
| Відмови можливі, але при іспитах не виявлялись                | Від 0,001 до 0,005                                            | 5                                       |
| Відмови можливі, виявлялись при іспитах                       | Від 0,001 до 0,005                                            | 6                                       |
| Відмови можуть статись                                        | Від 0,005 до 0,01                                             | 7                                       |
| Висока вірогідність відмови                                   | Від 0,01 до 0,10                                              | 8                                       |
| Вірогідні повторні відмови                                    | Більше 0,11                                                   | 10                                      |

|               |              |              |               |              |                                  |      |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|----------------------------------|------|
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підпис і дата | Інв. № подл. | <div>КР.142.6231м.03.05.ПЗ</div> | Арк. |
|               |              |              |               |              |                                  | 100  |
| Зм.           | Арк.         | № докум.     | Підпис        | Дата         |                                  |      |

Таблиця 5.2 – Оцінки послідовностей відмов

| Опис наслідків відмов                                                      | Оцінка наслідків у балах B <sub>2</sub> |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Відмова не приводить до помітних наслідків                                 |                                         |
| Наслідки відмови незначні                                                  | 1                                       |
| Відмова призводить до помітного зниження експлуатаційних характеристик     | 2-3<br>4-6                              |
| Висока ступінь незадоволення споживача, але загроза від відмови не можлива | 7-8                                     |
| Відмова несе загрозу для людей або навколишнього середовища                | 9-10                                    |

Таблиця 5.3 – Оцінка можливості виявлення відмови до постачання виробу

| Види відмов за можливістю знаходження до постачання                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Вірогідність знаходження відмови, оцінена розрахунками або експертним шляхом | Оцінка вірогідності у балах $B_3$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <p>Дуже висока вірогідність виявлення відмови при контролі, зборці, випробуваннях</p> <p>Висока вірогідність виявлення відмови при контролі, зборці, випробуваннях</p> <p>Помірна вірогідність виявлення відмови при контролі, зборці, випробуваннях</p> <p>Висока вірогідність постачання споживачу дефектного виробу</p> <p>Дуже висока вірогідність постачання споживачу дефектного виробу</p> | Більше 0,95                                                                  | 1                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Від 0,95 до 0,85                                                             | 2-3                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Від 0,85 до 0,45                                                             | 4-6                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Від 0,45 до 0,25                                                             | 7-8                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Менше 0,25                                                                   | 9-10                              |

Розрахунок критичності відмови: (редуктора, газопроводу турбіни, кожуху двигуна, електрогенератора, турбіни, трубопроводу).

- ## 1. Редуктор ГТУ

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=2 \cdot 1 \cdot 2=4 \text{ балів}$$

- ## 2. Газопровід турбіни.

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=4 \cdot 9 \cdot 4=144 \text{ балів}$$

| Инв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
|              |               |              |              |               |

|     |      |          |        |      |                       |      |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|     |      |          |        |      | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                       | 101  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

3. Кожух двигуна

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=2 \cdot 3 \cdot 2=12 \text{ балів}$$

4. Електрогенератор

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=1 \cdot 9 \cdot 1=9 \text{ балів}$$

5. Турбіна

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=6 \cdot 7 \cdot 4=168 \text{ балів}$$

6. Трубопровід

$$C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3=2 \cdot 9 \cdot 3=54 \text{ балів}$$

Таблиця 5.4 - Робочий лист для проведення АВНКВ ГТУ

| На-<br>ймену-<br>вання<br>елемен-<br>та (функ-<br>ції) | Вид<br>(опис)<br>відмови                | Можливі<br>причини<br>відмови                     | Наслідки відмови                           |                                                           |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                         | Рекоменда-<br>ції по попе-<br>редженню<br>(зниженню)<br>важкості<br>наслідків<br>відмови                                                                                                               | Мож-<br>ли-<br>вість<br>від-<br>мови | Кри-<br>тич-<br>ність<br>від-<br>мови |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                        |                                         |                                                   | На рівні,<br>який розг-<br>лядається       | На вище<br>стоящому<br>рівні                              | На рів-<br>ні ви-<br>робу<br>(ГТУ)                                                   | Методи і<br>засоби ви-<br>явлення і<br>локалізації<br>відмови                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                        |                                      |                                       |
| 1                                                      | 2                                       | 3                                                 | 4                                          | 5                                                         | 6                                                                                    | 7                                                                                                                                                                                                                       | 8                                                                                                                                                                                                      | 9                                    | 10                                    |
| Редук-<br>тор<br>ГТУ                                   | 1. Руйну-<br>вання<br>підшип-<br>ників. | 1. Дифект<br>при виро-<br>бництві                 | Ушко-<br>дження<br>внутрішів<br>редуктора. | Вихід з<br>ладу дви-<br>гуна.                             | Збій у<br>роблті<br>ГТУ.<br>Вихід з<br>ладу<br>елемен-<br>тів<br>устано-<br>вки.     | Контроль<br>якості при<br>виробницт-<br>ві.<br>Контроль<br>при мон-<br>тажі.                                                                                                                                            | Контроль<br>якості при<br>виробницт-<br>ві та мон-<br>тажі у декі-<br>лька етапів.<br>Багато ра-<br>зові випро-<br>бування.                                                                            | 0,001                                | 4                                     |
| Газоп-<br>ровід<br>турбіни                             | 1.Прорив                                | 1. Погане<br>уцільнен-<br>ня (герме-<br>тизація). | Витік газу.<br>Пожежа.                     | Отруєння<br>обслугову-<br>ючого пер-<br>соналу.<br>Вибух. | Пош-<br>код-<br>ження<br>ГТУ.<br>Зни-<br>ження<br>потуж-<br>ності<br>устано-<br>вки. | Вибухові<br>попере-<br>джувальні<br>клапани.<br>Проведення<br>інструкта-<br>жів для<br>обслугову-<br>ючого пер-<br>соналу що-<br>до дотри-<br>мування ви-<br>мог проти-<br>пожежної<br>безпеки й<br>вибухобез-<br>пеки. | Проведення<br>паралельно-<br>го (дублюю-<br>чого) газоп-<br>роводу.<br>Встановлен-<br>ня додатко-<br>вих датчиків<br>тиску. Зміц-<br>нення газоп-<br>роводу дода-<br>тковими<br>фланцями та<br>муфтами | 0,01                                 | 144                                   |

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дубл.  |  |
| Взам. інв. №  |  |
| Підпис і дата |  |
| Інв. № подл.  |  |

Продовж. табл. 5.4

| 1                | 2                    | 3                                              | 4                                                        | 5                                               | 6                                                       | 7                                                                                                                                   | 8                                                                                                                                                                                                                                                              | 9           | 10  |
|------------------|----------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|
| Кожух двигуна    | 1. Розрив            | 1. Ушкодження при експлуатації.                | Розрив корпусу                                           | Миттєве зниження ефективної потужності двигуна. | Вивід із ладу навішаних агрегатів. Зупинка усіх систем. | Автомат безпеки. Дотримання інструкції по експлуатації та технічному обслуговуванню двигуна, що додається заводом-виробником.       | Перевірка цілісності кожуха двигуна перед кожним запуском. Контроль термодинамічних та віброакустичних параметрів робочого тіла, що контактує з кожухом. Зміцнення кожуха ребрами жорсткості та додатковими переборками з металу                               | 0,001       | 12  |
| Електрогенератор | 1.Замикання.         | 1.Порушення умов експлуатації.                 | Враження електричним струмом персоналу.                  | Вибух.                                          | Виведення з ладу ГТУ. Аварійна зупинка установи.        | Захисне відключення; Диференціальний захист генератора й двигуна                                                                    | Удосконалення диференційного захисту.Щотижневий інструктаж з електробезпеки.                                                                                                                                                                                   | 0.000<br>05 | 9   |
| Турбіна          | 1.Надмірна вібрація. | 1.Ушкодження проточної частини; прогин ротора. | Ушкодження устаткування, травматизм персоналу.           | Руйнування ГТД.                                 | Пошкодження елементів ГТУ, та їх вихід з ладу.          | Автомат безпеки. Система автоматичного пожежогашіння. Контроль за температурою, відключити турбіну. Дотримання правил експлуатації. | Встановлення додаткових датчиків контролю за обертами турбіни генератора та компресора; Використовувати чутливі термопари за контролем температури перед турбіною та на виході із турбіни; Проведення інструктажу за інструкцією по експлуатації кожні 7 днів. | 0.005       | 168 |
| Трубопровід      | 1.Розрив.            | 1.Перевищення тиску.                           | Опіки обслуговуючого персоналу. Розгерметизація системи. | Людські жертви Ушкодження механізмів.           | Зовнішні ушкодження ГТУ..                               | Система аварійної сигналізації. Контроль за тиском                                                                                  | Використання найчутливіших термодатчиків тиску. При необхідності дублюючих.                                                                                                                                                                                    | 0.001       | 54  |

|               |               |              |              |              |
|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Підпис і дата | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Інв. № подл. |
|               |               |              |              |              |
|               |               |              |              |              |
|               |               |              |              |              |

|     |      |          |        |      |                       |      |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                       | 103  |

## Висновки

В результаті проведеного аналізу оцінки наслідків відмов за структурним методом щодо стійкості роботи елементів системи ГТУ яка працює на блоковій електростанції, були виявлені основні види відмов елементів системи ГТУ, які могли статися під час їх експлуатації. Були проаналізовані можливі причини відмов, а також наслідки цих відмов. На основі цього були вироблені рекомендації щодо попередження виникнення відмов і їх наслідків, а також конкретні заходи для запобігання відмов. Таким чином, в результаті проведеного аналізу щодо стійкості роботи елементів системи ГТУ виникнення аварійних ситуацій на розглянутому об'єкті можливі за умови халатного та непрофесійного відношення обслуговуючої команди до основних вузлів установки. Та при порушенні умов експлуатації. Запобіганням цьому фактору є проведення регулярних інструктажів за технічною документацією на експлуатацію двигуна і підвищення кваліфікації працівників.

Дослідивши елементи системи ГТУ визначаємо, що найбільш небезпечними відмовами є : руйнування підшипників редуктора, прорив газопроводу, розрив кожуху двигуна, замикання генератора, надмірна вібрація у турбіні, розрив трубопроводу. В наслідок чого крім матеріальних збитків можливі людські жертви.

Для запобігання відмов елементів системи ГТУ необхідно вжити такі заходи:

- Контроль якості при виробництві та монтажі у декілька етапів.

Багато разові випробування;

- Проведення паралельного (дублюючого) газопроводу. Встановлення додаткових датчиків тиску. Зміцнення газопроводу додатковими фланцями та муфтами;

- Перевірка цілісності кожуха двигуна перед кожним запуском. Контроль термодинамічних та віброакустичних параметрів робочого тіла, що контактує з кожухом. Зміцнення кожуха ребрами жорсткості та додатковими переборками з металу;

- Удосконалення диференційного захисту. Дотримання правил з електро безпеки.;

- Встановлення додаткових датчиків контролю за обертами турбіни генератора та компресора; Використовувати чутливі термопари за контролем температури пе-

|               |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № дубл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Взам. інв. №  |      |          |        |      |                       |      |
| Підпис і дата |      |          |        |      |                       |      |
| Інв. № подл.  |      |          |        |      |                       |      |
| Зм.           | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |      |          |        |      |                       | 104  |
|               |      |          |        |      |                       |      |

ред турбіною та на виході із турбіни; Проведення інструктажу за інструкцією по експлуатації кожні 7 днів.;

- Перевірка цілісності кожуха двигуна перед кожним запуском. Контроль термодинамічних та віброакустичних параметрів робочого тіла, що контактує з кожухом. Зміцнення кожуха ребрами жорсткості та додатковими переборками з металу;

При проектуванні будівлі електростанцій враховані вимоги ДБН В.2.2-28-2010 «Протипожежні норми», а також вимоги відповідних глав ДБН на проектування.

Забезпечено можливість безпечної евакуації людей із приміщень у випадку пожежі через евакуаційні виходи.

На випадок виникнення вогнища через замикання контактів в будь-якому з приміщень машинного відділення повинна бути передбачена автоматична пожежна сигналізація з тепловими та димовими датчиками із світловим і звуковим оповіщенням.

Всі газові двигуни незалежно від варіанта місця їхні установки мають бути обладнані системою автоматичного пожежогасіння.

|               |               |  |  |  |               |               |               |               |     |      |          |        |      |                       |      |
|---------------|---------------|--|--|--|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| Инов. № подл. | Підпис і дата |  |  |  | Инов. № дубл. | Взам. інов. № | Підпис і дата | Инов. № подл. | Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | КР.142.6231м.03.05.ПЗ | Арк. |
|               |               |  |  |  |               |               |               |               |     |      |          |        |      |                       | 105  |
|               |               |  |  |  |               |               |               |               |     |      |          |        |      |                       |      |



## Висновки

За завданням кафедри Турбін було розроблено газотурбінний агрегат (ГТА) потужністю  $N_e=60$  МВт для приводу генератора струму електростанції.

В кваліфікаційній роботі виконано оптимізацію ефективних показників, термодинамічні розрахунки газотурбінного двигуна, включаючи вибір і обґрунтування основних параметрів установки: максимальної температури в циклі ( $T_3$ ), розрахункового мірі підвищення тиску в циклі ( $\pi_{\kappa\Sigma}$ ). В результаті розрахунку циклу на режимі повної потужності при розрахунковому мірі підвищення тиску  $\pi_{\kappa\Sigma}=20$  отримано наступні параметри: ефективний ККД установки  $\eta_e=0,37$ , питома потужність  $N_{eyd}=300,23$  кВт/(кг/с), питома витрата палива  $C_{Ne}=0,1948$  кг/(кВт год.), температура газів на виході з установки  $T_{vx}=794,43$ К.

При габаритно-компоновочному розрахунку ГТД розраховувалися його елементи (турбокомпресорний блок, камера згоряння). Компресор осьовий має 15 ступенів. Камера згоряння протитокова трубчасто-кільцева з горизонтальним роз'ємом, має 20 жарових труб. Для змішування газу з повітрям та подачі в камеру служить горілочний пристрій, а запалення суміші забезпечують плазмотроні запальники. Турбіна двигуна складається з осьової чотирьохступінчастої турбіни.

Конструктивні розрахунки в проєкті містять розрахунок на міцність робочої лопатки 4-го ступеня турбіни, розрахунок на міцність диску 4-го ступеня. Виконано розрахунок закрутки робочої лопатки 4-го ступеня турбіни.

В розділі охорони праці проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів в залі електростанції, розроблено заходи щодо їх зниження. Розраховано систему пожежогасіння в приміщенні електростанції.

В розділі охорони навколишнього середовища розглянуто вплив роботи газотурбінної установки на навколишнє середовище та розроблено заходи щодо зменшення шкідливих викидів в атмосферу до рівнів, встановлених стандартами ISO.

В розділі цивільного захисту представлено аналіз видів, наслідків і критичності відмов (АВНKB) при функціонуванні електростанції.

|              |               |              |              |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | <p>горілочний пристрій, а запалення суміші забезпечують плазмотроні запальники. Турбіна двигуна складається з осьової чотирьохступінчастої турбіни.</p> <p>Конструктивні розрахунки в проекті містять розрахунок на міцність робочої лопатки 4-го ступеня турбіни, розрахунок на міцність диску 4-го ступеня. Виконано розрахунок закрутки робочої лопатки 4-го ступеня турбіни.</p> <p>В розділі охорони праці проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів в залі електростанції, розроблено заходи щодо їх зниження. Розраховано систему пожежогасіння в приміщенні електростанції.</p> <p>В розділі охорони навколишнього середовища розглянуто вплив роботи газотурбінної установки на навколишнє середовище та розроблено заходи щодо зменшення шкідливих викидів в атмосферу до рівнів, встановлених стандартами ISO.</p> <p>В розділі цивільного захисту представлено аналіз видів, наслідків і критичності відмов (АВНKB) при функціонуванні електростанції.</p> |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          | <div> <div>КР.142.6231м.03.В.ПЗ</div> <div>Арк. 106</div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

## Список використаних джерел

1. Романовський Г. Ф., Сербін С. І., Патлайчук В. М. Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1 : Агрегати виробництва України та Росії : навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2005. 344 с., 12 с. іл.
2. Ващиленко М. В. Оптимізаційні розрахунки термодинамічних циклів суднових і енергетичних ГТА в задачах автоматизованого проектування : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 44 с.
3. Романовський Г. Ф., Ващиленко М. В., Сербін С. І. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 304 с.
4. Романовський Г. Ф., Сербін С. І. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2000. 259 с.
5. Романовський Г. Ф., Сербін С. І. Екологічно чисті камери згоряння газотурбінних установок : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2002. 84 с.
6. Риске Ю. С. Расчет средств пожаротушения : учеб. пособ. Николаев : НКИ, 1978.
7. Михайлюк В. О. Цивільний захист. Надзвичайні ситуації : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003.

|              |               |              |              |               |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |
|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--|--|--|------|
| Інв. № подл. | Підпис і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підпис і дата | 6. Рискє Ю. С. Расчет средств пожаротушения : учеб. пособ. Николаев : НКИ, 1978.                |                      |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               | 7. Михайлюк В. О. Цивільний захист. Надзвичайні ситуації : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003. |                      |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |
|              |               |              |              |               |                                                                                                 | КР.142.6231м.03.Л.ПЗ |  |  |  | Арк. |
|              |               |              |              |               |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |
| Зм.          | Арк.          | № докум.     | Підпис       | Дата          |                                                                                                 |                      |  |  |  |      |