

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ М. С. Кулик

« _____ » _____ лютого 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«ГАЗОТУРБІННІ УСТАНОВКИ І КОМПРЕСОРНІ СТАНЦІЇ»

**Тема: Дослідження шляхів модернізації газоперекачувальних агрегатів на
компресорній станції м. Ромни**

Виконавець: студент ГУ-210 М

Мельник Михайло Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент

Андрієшин Михайло Петрович

Консультанти з окремих розділів:

«Охорона праці» к.т.н., доцент

Казанець В.І.

«Охорона навколишнього середовища» к.т.н., доцент

Дмитруха Т.І.

Нормоконтролер: к.т.н., доцент

КИЇВ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____ аерокосмічний _____
Кафедра _____ авіаційних двигунів _____
Освітній ступінь _____ магістр _____
Спеціальність _____ 142 Енергетичне машинобудування _____
Освітньо-професійна програма Газотурбінні установки і компресорні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д. т. н., професор _____ М.С. Кулик

« 15 » жовтня 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Мельника Михайла Сергійовича

1. Тема роботи: «Дослідження шляхів модернізації газоперекачувальних агрегатів на компресорній станції м. Ромни» затверджена наказом ректора від 25.09.19 №2187/ст.

2. Термін виконання роботи: з 15 жовтня 2019 року по 31 грудня 2019 року та з 13 січня 2020 року по 31 січня 2020 року.

3. Вихідні дані роботи: технологічна схема та параметри роботи КС-3 м.Ромни.

4. Зміст пояснювальної записки: реферат, зміст, перелік умовних скорочень, аналіз сучасного стану компресорної станції КС-3 м. Ромни, аналіз ефективності роботи КС-3 м. Ромни, охорона навколишнього середовища, охорона праці, висновки.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: креслення апарату повітряного охолодження оливи двигуна, схема системи масло забезпечення двигуна ГТД-10В, плакати: Т-S діаграма технологічного процесу компримування природного газу в решітці ротора відцентрового нагнітача ЦН 235-21-1, зміна адіабатичної та політропної роботи стиснення.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Опрацювання літератури	20.10.19– 10.11.19	
2.	Вступ. Аналіз сучасного стану компресорної станції КС-3 м. Ромни.	11.11.19– 30.11.19	
3.	Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 235-21-1 КС-3 м. Ромни.	30.11.19– 08.11.19	
4.	Розрахунок параметрів роботи АПО оливи системи змащення двигуна ГТД-10В КС-3 м. Ромни.	09.11.19– 23.12.19	
5.	Охорона праці	24.12.19– 04.01.20	
6.	Охорона навколишнього середовища	05.01.20– 11.01.20	
7.	Графічні роботи та оформлення розрахунково-пояснювальної записки	11.01.20– 20.01.20	
8.	Підготовка доповіді для захисту дипломного проекту	20.01.20– 25.01.20	

7. Консультація з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Казанець В.І.		
Охорона навколишнього середовища	Дмитруха Т.І.		

8. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2019 р.

Керівник дипломної роботи : _____ М.П. Андрійшин
(підпис керівника)

Завдання прийняв до виконання: _____ М.С. Мельник
(підпис випускника)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Дослідження шляхів модернізації газоперекачувальних агрегатів КС м. Ромни»: 121 сторінка, 24 таблиці, 14 рисунків, 20 використаних джерел, 9 додатків.

Об'єкт дослідження – ГПА-10-01Е КС-3 м. Ромни, нагнітач ЦН 235-21-1, АПОО.

Предмет дослідження – ефективність роботи ГПА КС-3 в тому числі нагнітача ЦН-235-21-1 та системи підготовки оливи.

Мета дипломної роботи – визначення ефективності роботи ГПА в процесі перекачки природного газу та ефективності регенерації оливи системи маслозабезпечення двигуна.

Метод дослідження – аналітичний та розрахунковий. Обробка даних проведена з використанням математичної статистики та обчислювальної техніки.

Наукова новизна – комплекс запропонованих рішень може бути використаний в процесі модернізації компресорних станцій магістральних газопроводів.

Практичне значення отриманих результатів – запропонована система охолодження оливи з застосуванням АПО приводить до значної економії електричної енергії, до 40% в рік, завдяки впровадженій системі регулювання продуктивності охолодження, шляхом плавного регулювання частоти обертання робочих коліс вентиляторів. Система розрахунків дозволяє оцінити ефективність примінення проточної частини нагнітача.

**КОМПРЕСОРНА СТАНЦІЯ КС-3 м. РОМНИ, МОДЕРНІЗАЦІЯ,
АПАРАТ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ОЛИВИ**

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ КС-3 м. РОМНИ	10
1.1. Загальна характеристика компресорної станції	10
1.2. Дослідження шляхів модернізації ГПА-10-01 КС-3	11
1.2.1. Аналіз ефективності модернізації ГПА	11
1.2.2. Аналіз модернізації АПО оливи системи змащення ГПА	15
1.3. Опис конструкції ГПА-10-01Е	18
1.3.1. Опис конструкції ГТД-10В.....	18
1.3.2. Опис конструкції нагнітача типу ЦН 235-21-1	25
Висновки за розділом	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КС-3 м. РОМНИ.....	29
2.1. Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу.....	29
2.2. Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 235-21-1	33
2.3. Розрахунок добових значень показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 235-21-1	41
2.4. Розрахунок параметрів роботи АПО	48
Висновки за розділом	58
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	59
3.1. Вплив викидів забруднюючих речовин на навколишнє середовище	59
3.2. Розрахунок викидів забруднюючих речовин.....	61
3.3. Економічна оцінка збитку від забруднення атмосфери	64
3.4. Заходи щодо зменшення викидів забруднюючих речовин	67
Висновки за розділом	68
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	69
4.1. небезпечні і шкідливі виробничі фактори.....	69
4.2. Вплив шкідливих факторів на людину і заходи щодо зменшення впливу цих факторів	71
4.3. Розрахунок контура заземлення АПО	73
4.4. Пожежо– і вибухобезпека на КС.....	74

4.5. Інструкція з техніки безпеки оператора МГ	76
Висновки за розділом	80
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В	
Додаток Г	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГТС – газотранспортна система;

МГ – магістральний газопровід;

КС – компресорна станція;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ГКС – газокомпресорна служба;

КЦ – компресорний цех;

ГПА – газоперекачувальний агрегат;

ВЦН – відцентровий нагнітач;

АПО – апарат повітряного охолодження;

ГТД – газотурбінний двигун;

САК – система автоматичного керування;

КНТ – компресор низького тиску;

КВТ – компресор високого тиску;

КЗ – камера згоряння;

ТВТ – турбіна високого тиску;

ТНТ – турбіна низького тиску;

СТ – силова турбіна;

СА – сопловий апарат;

ЛВУМГ – лінійне виробниче управління магістрального газопроводу;

ГРС – газорозподільча станція.

ВСТУП

Одним з найпрогресивніших і економічних видів палива є природний газ.

Транспортування та забезпечення безперебійної його подачі споживачам є одними з основних завдань газотранспортної системи (ГТС). Транспортування природного газу здійснюється магістральним газопроводом (МГ), завдяки компресорним станціям (КС), які підтримують робочий тиск у МГ та потрібну витрату газу.

В тенденціях нашого часу гостро стає питання енергозбереження та економічної ефективності КС. Вирішення проблем з енергозбереження може містити цілий комплекс необхідних заходів. Враховуючи специфіку обладнання КС, існують витрати енергії, газу, яких можна позбутися повністю та такі, яких, тільки частково. Оскільки деяких втрат неможливо позбутися, пріоритетними стають інші напрямки, серед усіх можливих, які призводять до підвищення економічної ефективності КС.

Вирішити такі проблеми на КС можливо шляхом заміни чи модернізації застарілого використовуваного обладнання, яке відпрацювало свій ресурс та більшість якого не є актуальним серед сучасного оснащення і технологій. Використання сучасного обладнання дає можливість відповідати більш високим вимогам та стандартам, забезпечуючи вищу ефективність, завдяки більшим значенням коефіцієнта корисної дії (ККД) та піднімаючи економічність в цілому КС на новий, вищий рівень.

Бажаним, в умовах КС є зменшення енерговитрат, серед яких і витрати електроенергії. Виконуючи модернізацію є можливою заміна апаратів охолодження оливи на нові, сучасні, з запровадженням автоматичним регулюванням витрат повітря, шляхом зміни частоти обертання вентиляторів, в залежності від температури навколишнього повітря, що й приведе до зменшення витрат електроенергії на КС. Існуючі апарати, звичайно, забезпечують охолодження оливи двигуна та нагнітача до потрібних температур, проте не є енергозберігаючими, так як існує можливість використання вентиляторів лише на номінальному режимі роботи, без можливості зміни частоти їх обертання.

Оскільки регулювання витрати повітря здійснюється лише конструктивними жалюзями, то є можливим надходження оливи до ГПА з більшими чи меншими значеннями температури, що може привести до зменшення ресурсу підшипників опор роторів двигуна та нагнітача. Враховуючи всі недоліки існуючих апаратів охолодження є доцільною заміна їх, в рамках модернізації, на нові, більш технологічні, ефективніші та економніші.

Дослідження шляхів модернізації газоперекачувальних агрегатів та розрахунки проводились на базі КС-3 м. Ромни.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ КС-3 м. РОМНИ

1.1. Загальна характеристика компресорної станції

Ромненська газокompресорна служба (ГКС) має одну промислову земельну ділянку на якій розташовано три компресорні цехи (КЦ): КС-32, КС-32П, КС-3.

КС призначена для компримування природного газу до тиску 55-75 атм., його очищення, осушення, охолодження та забезпечення подальшого транспортування мережею МГ.

Для забезпечення необхідної надійності транспорту газу Ромненська ГКС обладнана стаціонарними акумуляторними установками, хімлабораторіями, мехмайстернями, зварювальними ділянками, ємкостями для зберігання паливомастильних матеріалів, антифризу та ін..

КС-3 м. Ромни обслуговує газопровід «Єлець – Кременчук – Кривий Ріг», який був введений в експлуатацію у 1986 році. Діаметр трубопроводу 1420 мм, а робочий тиск 75 бар. Потужність даного газопроводу складає 26 млрд. м³ в рік [1].

КС-3 була введена в експлуатацію 1987 р. Загальна потужність складає 70 МВт. Продуктивність станції в 90 млн. м³ на добу досягається використанням семи газоперекачувальних агрегатів (ГПА): шести ГПА-10-01, з приводом від газотурбінного двигуна ДР-59Л потужністю 10 МВт та одного ГПА-10-01Е з приводом від ГТД-10В.

Дані агрегати блочно-контейнерного виконання. Кліматичне виконання четвертої категорії, відповідно до ГОСТ 15150-69, дає можливість використання ГПА при температурі повітря на вході в двигун від мінус 55°C до +40°C, а також при наявності опадів (дощ, сніг). В якості паливного газу використовується газ, що відповідає вимогам ГОСТ 5542-87.

До складу ГПА входить відцентровий нагнітач (ВЦН) природного газу типу ЦН 235-21-1. Нагнітач складається з циліндра (корпус) і пакету нагнітача. Стиснення газу виконується двома ступенями з послідовним включенням. Тиск

газу на виході з нагнітаючого патрубку 76 бар. Об'ємна продуктивність нагнітача при температурі 20 °С і тиску 1 бар, складає 18,3 млн. м³ за добу. Частота обертання нагнітача 4800 об/хв. Температура газу на вході в нагнітач 15 °С.

1.2. Дослідження шляхів модернізації ГПА-10-01 КС-3

Серед можливих шляхів модернізації, на базі КС-3 було виконано: заміна блоку двигуна, реконструкція нагнітача та системи маслозмащення, заміна турбодетандерного запуску двигунів на електростартери, заміна блоку паливної апаратури. Також планується капітальний ремонт системи охолодження оливи двигуна та нагнітача, з заміною апаратів повітряного охолодження (АПО) оливи.

1.2.1. Аналіз ефективності модернізації ГПА

Вперше модернізацію ГПА №5 КС-3 було проведено у 2005 році, шляхом заміни блоку ГПА-10-01 з двигуном ДР-59Л на блок ГПА-10-МН70 з двигуном ДН-70Л. Двигун ДН-70Л виробництва заводу ДП «Зоря» – «Машпроект», мав переваги над ДР-59Л за технічними показниками. Зокрема вищий ККД, що становить 35% при номінальній потужності у ДН-70Л, перевищує ККД двигуна ДР-59Л, що становить 28,8% на номінальному режимі роботи. За результатами дослідно-промислової експлуатації ГПА-10МН70, двигун ДН-70Л показав низьку надійність роботи. Кількість зупинок та повторних запусків ГПА втричі більша ніж інших ГПА-10-01 з ДР-59Л, тому від експлуатації ГПА-10МН70 відмовились.

Відповідно до рішень технічних нарад було виконано повторну модернізацію агрегату №5 КС-3 Ромненської ГКС. Модернізація виконувалася шляхом заміни блоку ГПА-10МН70 з двигуном ДН-70Л на блок ГПА-10-01Е з двигуном ГТД-10В та реконструкції існуючого ВЦН ЦН 235-21-1, його системи маслозмащення та ущільнення [2].

При реконструкції нагнітача було передбачено і проведено наступні заходи підвищення ефективності та надійності:

- демонтаж коробки приводів, блока клапанів, фільтр оливи в системі змащування нагнітача;
- заміна ротора нагнітача;
- заміна ресори ГТД-ВЦН;
- заміна чи ремонт штатної кришки кожуха стикової частини нагнітача з лабіринтним графітовим ущільненням.

Проектом передбачено переобв'язку системи маслозмащення і ущільнення нагнітача за штатною схемою ГПА-10-01, з реконструкцією трубопроводів подачі оливи з маслобаків до газотурбінного двигуна (ГТД) і ВЦН та трубопроводів відкачки оливи двигуна і нагнітача.

Заміна блоку двигуна ДН-70Л на ГТД-10В супроводжувалась реконструкцією таких елементів зовнішніх підключень, систем та елементів ГПА:

- встановлення нового блоку газорегулюючої апаратури з реконструкцією трубопроводу подачі паливного газу та трубопроводу зтравлювання газу з блоку паливної апаратури;
- реконструкція агрегатного трубопроводу лінії відбору повітря на технологічні потреби КС;
- відновлення блоку фільтрів двигуна;
- реконструкція блоку маслофільтрів нагнітача;
- реконструкція елементів шахти забору охолоджуючого повітря в контейнер ГТД.

Відновлено штатний вузол відкачування-закачування оливи в маслобак ГТД в укритті ГПА (блок фільтрів двигуна). На лінії відкачування оливи встановили насосний агрегат НМШ 8-25-6,3/2,5. Даний агрегат складається з насосу масляного шестеренчатого DN50 продуктивністю 6,3 м³/год і вихідним тиском 0,25 МПа і електродвигуна потужністю 2,2 кВт. Також відреконструйовано блок сепарації оливи (блок масляних фільтрів нагнітача).

Демонтовано наявний блок паливної апаратури ГПА з двигуном ДН-70Л та встановлено газорегулюючу апаратуру ГРА-59.000-01, який я розглядав у своїй дипломній роботі здобувача освітнього рівня бакалавр [3]. Проведена переобв'язка впровадженого двигуна ГТД-10В підходящими трубопроводами паливного газу та свічного трубопроводу з блоку газорегулюючої апаратури. Були демонтовано пусковий електронасос маслозмащення, коробку приводів, трубопровід подачі оливи на пусковий електронасос змащення, дренажний трубопровід зливу оливи від блоку ГТД до маслобаку нагнітача, трубопроводи обв'язки маслососів, навішених на коробку приводів нагнітача. Було передбачено ремонт кришки кожуха стикової частини нагнітача з лабіринтним графітовим ущільненням ресори ГТД-ВЦН.

Щодо системи автоматичного керування (САК) ГПА було передбачено адаптацію наявної САК на ГПА №5, та заміну за необхідності застарілих засобів автоматизації, приладів та кабелів автоматизації. Наявна САК ГПА була розроблена ТзОВ НВП «Нова техніка» (м.Львів) і впроваджена на ГПА у 2005 році. Контроль параметрів ГПА здійснюється за допомогою сучасних датчиків температури, тиску, рівня та приладів контролю загазованості.

САК ГПА КС-3 здійснює взаємодію з такими системами:

- підсистеми контролю вібрації нагнітача та двигуна;
- автономні системи пожежогасіння;
- система контролю загазованості;
- САК технологічного процесу КЦ.

САК ГПА здійснюватиме керування в автоматичному режимі кранами ГПА та електричним технологічним обладнанням, приводом електрозапускання турбіни, приводами вентиляторів АПО оливи, агрегатних насосів оливи, засувки оливи, а також нагрівачів оливи тощо.

Двигун ДН-70Л виробництва має кращі технічні характеристики, досягається ККД, що дорівнює 35% на номінальному режимі роботи двигуна та менша витрата паливного газу, що становить 3077 м³/год паливного газу, за нормальних умов, у порівнянні ДР-59Л витрачає 3300 м³/год паливного газу, за

нормальних умов. Проте, на відмінну від ККД, повний ресурс двигуна ДН-70Л – 60 тис. год значно менший від ресурсу ДР-59Л і ГТД-10В, що дорівнює 100 тис. год. У зв'язку з незадовільними показниками надійності, блок двигуна ДН-70Л було замінено на блок ГТД-10В.

Двигун ГТД-10В являє собою модернізований двигун ДР-59Л (зі збільшенням ресурсу двигуна, шляхом заміни проточної частини) і не має ніяких відмінностей за монтажними елементами, габаритними розмірами і вимогами до експлуатації [4]. Повний середній ресурс даного двигуна складає 100 000 год, середній ресурс між капремонтами 25000 год.

Основні технічні дані двигуна ГТД-10В на різних режимах роботи наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні технічні дані двигуна ГТД-10В

Режим	Потужність, кВт	Частота обертання силової турбіни, об/хв	Фактична питома витрата паливного газу, г/Квт·год
Номінальний	10000	4950	231
0,75 від номінального	7500	4950	249
0,5 від номінального	5000	4950	286
0,25 від номінального	2500	4950	399

ККД даного двигуна, ГТД-10В, складає 31,5%, для порівняння, у звичайного, не модернізованого ДР-59Л, ККД становить 27,6%.

Основні технічні дані двигуна ДР-59Л наведено в табл. 1.2

Основні технічні дані ГТД ДР-59Л

Режим	Потужність, кВт	Частота обертання силової турбіни, об/хв	Фактична витрата паливного газу, г/Квт·год
Номінальний	10000	3000	268
0,75 від номінального	7500	3000	292
0,5 від номінального	5000	3000	335
0,25 від номінального	2500	3000	472

Фактична витрата паливного газу модернізованого двигуна ГТД-10В менша ніж ДР-59Л, що робить доцільним проведення модернізації ГПА з заміною блоку двигуна.

1.2.2. Аналіз модернізації АПО оливи системи змащення ГПА

Метою модернізації є заміна існуючих, морально та фізично застарілих АПО оливи ГПА та покращення ефективності і надійності роботи системи охолодження оливи ГПА із застосуванням сучасних більш ефективних та економічних апаратів виробництва ПАТ «БЗ РЕМА».

Існуючі АПО угорського виробництва типу 06-10, що встановлені для охолодження оливи на ГПА, складаються з трьох охолоджуючих секцій, у кожній з яких встановлено два осьових вентилятори [5]. Охолоджуючий елемент – ребристий поверхневий теплообмінник, виготовлений з алюмінію. Конструкцією АПО передбачено жалюзі, як з боку входу повітря в апарат – нижні жалюзі, так і з боку виходу повітря – верхні жалюзі. Гнучке регулювання витрати повітря виконується за допомогою верхніх жалюзей. Олива проходить трубками охолоджуючого елемента і охолоджується повітрям, що проходить через охолоджувач при засмоктуванні вентилятором. Схему руху повітря через АПО типу 06-10, показано на рис. 1.3.

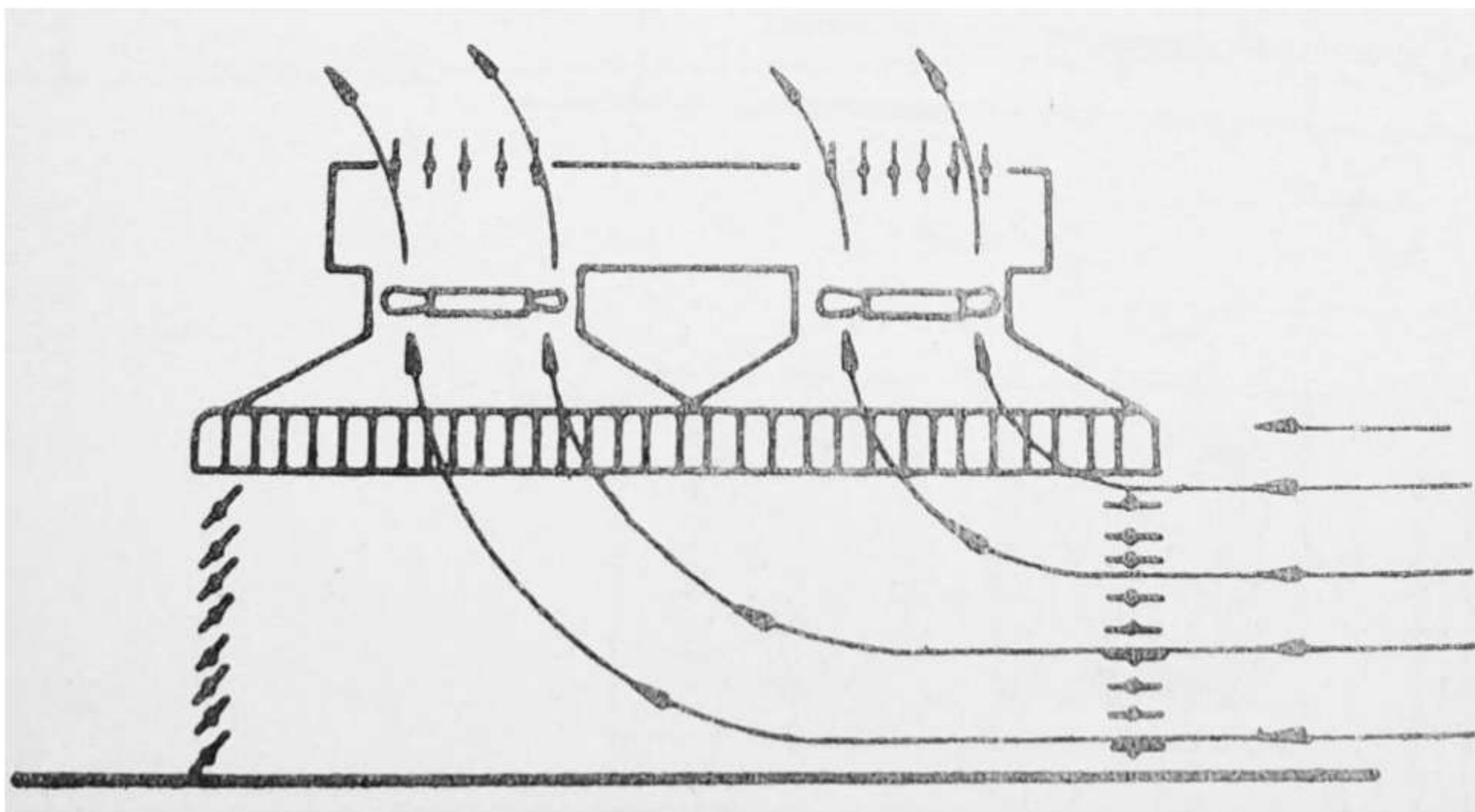


Рис. 1.3. Схема руху повітря через АПО 06-10

Пропонується заміна АПО оливи угорського виробництва типу 06-10 на сучасні модульні апарати АПОО210.8.6,5к-ПМ2 [6]. Апарат складається з маслоохолоджувача і вбудованої апаратури керування, змонтованих в одному корпусі. Маслосистема апарату включає дві теплообмінні секції – верхню і нижню, вхідний трубопровід, вихідний трубопровід. При роботі апарату в режимі охолодження, гаряча олива подається на вхідний трубопровід АПО, пройшовши через масляні канали теплообмінних секцій, охолоджується повітрям, що нагнітається працюючими вентиляторами охолодження. В установці АПО оливи, передбачено можливість передпускового підігріву оливи за допомогою електрокалориферів системи підігріву. Охолоджуюче повітря поступає в апарат через відкриті жалюзі і, пройшовши через повітряні канали теплообмінних секцій, викидається вентиляторами назовні. Регулювання температури оливи на виході з АПО здійснюється автоматичним включенням чи виключенням потрібної кількості робочих вентиляторів та автоматичним регулюванням продуктивності охолодження, шляхом плавної зміни частоти обертання робочих коліс вентиляторів.

Порівняльна характеристика існуючих та запроектованих АПО оливи приведена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика існуючих та запроектованих АПО оливи

Показник	АПО0210.8.6,5к- ПМ2	АПО типу 06- 10
Витрата охолоджуваної оливи, м ³ /год	75,6	75,6
Кількість вентиляторів, шт	8	6
Встановлена потужність вентиляторів, кВт	29,6	33
Номінальна частота обертання, хв ⁻¹	1600	720
Номінальна споживана потужність у режимі охолодження, кВт	29,6	33
Продуктивність охолодження, ккал/год	499 044	420 000
Маса апарату, кг	5000	5100
Металоемність апарату, кг/кВт	8,6	10,45

Застосування АПО оливи виробництва ПАТ «БЗ РЕМА» відповідає сучасним вимогам з енергозбереження, що можна оцінити за такими критеріям:

- сумарне енергоспоживання ново встановлених АПО оливи менше ніж існуючих приблизно на 10%;
- додаткову економію електроенергії (до 40% в рік) забезпечить система частотного регулювання обертів вентиляторів в залежності від температури мастила на вході апарату та температури навколишнього середовища.

У процесі тривалої експлуатації АПО оливи відбулося зношення його вузлів. Через внутрішню забрудненість труб зменшується теплопровідна спроможність апаратів охолодження. Як наслідок, відбувається недостатнє охолодження мастила. В результаті відбувається зменшення ККД ГПА в цілому. Дана ситуація безпосередньо призводить до екологічних та економічних збитків. Екологічні втрати заключаються у можливих розривах трубних пучків АПО та витоках оливи. Економічні збитки пов'язані з неоптимальною (збільшеною) роботою по охолодженню мастила, тобто перевитрата ресурсів. Будівництво нових АПО оливи підвищить надійність

роботи ГПА, а можливість забруднення навколишнього природного середовища зводиться до мінімуму.

1.3. Опис конструкції ГПА-10-01Е

У складі ГПА-10-01Е використовується двигун ГТД-10В та нагнітач типу ЦН 235-21-1. Двигун ГТД-10В отриманий у процесі модернізації ДР-59Л та не має ніяких відмінностей за монтажними елементами, габаритними розмірами і вимогами до експлуатації. Нагнітач у складі ГПА-10-01Е має відновлену проточну частину та систему масло змащення та ущільнень.

1.3.1. Опис конструкції ГТД-10В

Двигун ГТД-10В використовується у складі ГПА-10-01Е, для приводу нагнітача типу ЦН 235-21-1. ГТД-10В, являє собою модернізований ДР-59Л, з аналогічною конструкцією та покращеною проточною частиною, володіє кращими показниками економічності та підвищеним ресурсом. ГТД-10В має максимальну взаємозамінність, та відповідає всім габаритним розмірам та кріпленням ДР-59Л.

Двигун ГТД-10В складається з наступних основних складових частин: компресора низького тиску (КНТ), компресора високого тиску (КВТ), камери згоряння (КЗ), турбіни високого тиску (ТВТ), турбіни низького тиску (ТНТ), силової турбіни (СТ) і виносної коробки приводів [7].

КНТ і КВТ приводяться в обертання відповідно ТНТ і ТВТ.

Компресори і турбіни, що їх приводять у рух, утворюють два кінематичних між собою не пов'язаних каскади – каскад низького тиску і каскад високого тиску, які обертаються з різними частотами обертання на кожному з режимів роботи двигуна.

СТ через ресору приводить в рух нагнітач і кінематично не пов'язана з каскадами низького і високого тиску.

Принцип роботи двигуна полягає в тому, що повітря через вхідний пристрій засмоктується КНТ, стискається в ньому і, проходячи через перехідник, призначений для плавного підведення повітря, надходить в КВТ, де відбувається остаточне стиснення повітря.

З КВТ стиснене повітря надходить в задній корпус, де в кільцевому дифузори відбувається зниження швидкості потоку повітря, що підводиться в КЗ. У КЗ спалюється природний газ, що подається через форсунки. Частина повітря бере участь у згорянні природного газу, а інша частина охолоджує жарові труби КЗ і, змішуючись з продуктами горіння, утворює газ необхідної температури, енергія якого використовується в турбінах двигуна.

З КЗ газ надходить у послідовно розташовані ТВТ і ТНТ і СТ. У турбінах відбувається перетворення теплової енергії гарячих газів у механічну роботу.

Потужність, що розвивається ТВТ і ТНТ, використовується для приводу відповідно КВТ і КНТ. Потужність, що розвивається СТ, використовується для приводу нагнітача.

Зовнішня коробка приводів приводиться в обертання ресорою, з'єднаною з ротором КНТ.

КНТ – семиступінчатий, призначений для стиснення атмосферного повітря і подачі його через перехідник у КВТ.

КНТ складається з вхідного пристрою, переднього корпусу, корпусу КНТ, ротора КНТ, встановленого на передній і задній опорах.

Вхідний пристрій призначений для плавного підведення атмосферного повітря в компресор і складається з зовнішнього і внутрішнього обтікачів. Кільцевий канал між ними слугує початком проточної частини двигуна.

Зовнішній обтікач виконаний зварним, коробчатої конструкції складається з профільованої і конічної стінок і фланців .

Внутрішній обтікач виконаний зварним, складається з профільованої стінки і двох фланців. Внутрішній обтікач кріпиться до переднього корпусу за допомогою конуса обтікача і гайки. Конус обтікача – зварний і складається зі стінки і двох фланців.

Разом з внутрішнім обтікачем до переднього корпусу кріпиться кришка лабіринту, ущільнювальні поверхні якого з ущільнювальними гребінцями корпусу муфти утворюють дворядне лабіринтне ущільнення, що обмежує масляну порожнину переднього корпусу з боку входу повітря в КНТ.

Еластична муфта призначена для компенсації зламу осей ротора КНТ і вала редуктора виносної коробки приводів і передачі крутного моменту від ротора КНТ на вал редуктора, складається з корпусу муфти, щоки муфти і втулки. Для розвантаження щоки муфти від осьових зусиль, що виникають при теплових розширеннях, у муфті встановлений упорний валик, що сприймає осьові зусилля.

Передня цапфа ротора КНТ через еластичну муфту і вал редуктора передає крутний момент на виносну коробку приводів при режимній роботі двигуна. При запуску двигуна крутний момент передається від виносної коробки приводів через вал, еластичну муфту на передню цапфу ротора КНТ.

Передній корпус КНТ призначений для розміщення вхідного направляючого апарату, що слугує для подачі повітря під необхідним кутом на першу ступінь робочих лопаток ротора КНТ, передньої опори ротора КНТ.

Передній корпус складається з зовнішньої і внутрішньої стінок жорстко з'єднаних між собою.

Корпус КНТ з'єднуючись з переднім корпусом і перехідником є частиною силової схеми двигуна, він виконаний у вигляді малого усіченого конуса, посиленого поперечними і поздовжніми ребрами жорсткості.

Усередині корпусу, в шести циліндричних проточках встановлюються напрямні апарати, що кріпляться до корпусу.

Напрямний апарат є частиною компресорної ступені і призначений для здійснення процесу стиснення повітря в компресорі і складається із зовнішнього і внутрішнього кілець, між якими розміщені напрямні лопатки. Для кріплення напрямних лопаток в зовнішньому кільці виконані пази прямокутного профілю відповідно кількості напрямних лопаток, а у внутрішньому кільці виконано таку ж кількість радіальних отворів. На

внутрішніх кільцях зроблені проточки, в які набираються міднографітові вставки поєднані з гребінцями, виконаними на дисках ротора, утворюють лабіринтні ущільнення, що перешкоджають перетіканню повітря між ступенями компресора.

Ротор КНТ барабанно-дискової конструкції складається з семи дисків з лопатками, двох цапф, лабіринтів і труби. Ротор має передню і задню опори. Передня опора розміщена в передньому корпусі і складається з корпусу та змонтованих у ньому двох кулькових підшипників, які сприймають радіальні та осьові навантаження. Для запобігання потрапляння оливи з передньої опори у повітряний тракт КНТ, за підшипником встановлено масловідбивач та дворядне лабіринтне ущільнення.

При роботі двигуна у внутрішню порожнину ротора, через отвори в барабанній частині диска п'ятого ступеня, подається повітря, яке використовується для підпору ущільнення передньої опори КНТ.

У задній опорі використовується роликовий підшипник, що сприймає радіальне навантаження та допускає температурне зміщення ротора в осьовому напрямі. Підведення оливи на змащення та охолодження підшипника здійснюється через три форсунки колектора, який встановлено в задній стінці опори.

КВТ слугує для остаточного стиснення повітря, що надходить з КНТ через перехідник і подачі його в КЗ.

КВТ складається з: перехідника, корпусу КВТ з напрямними апаратами, ротора і заднього корпусу.

Перехідник розташований між КНТ і КВТ. У перехіднику розміщена задня опора ротора КНТ, передня опора ротора КВТ, корпус з датчиком виміру обертів і отвором для установки ключа ручної прокрутки ротора КВТ. Через корпус здійснюється підведення оливи до задньої опори ротора КНТ і передньої опори ротора КВТ.

Для надання потоку повітря, що виходить з КНТ, осьового напрямку, на вході в перехідник встановлений дворядний напрямний апарат КНТ. На виході

повітря з перехідника встановлено вхідний напрямний апарат КВТ. Призначення його аналогічно призначенню вхідного напрямного апарату КНТ. На зовнішній стінці перехідника знаходяться: верхня горизонтальна площадка – для кріплення заглушки, на якій розміщена бобишка датчика виміру обертів ротора КВТ і майданчик для установки ключа ручної прокрутки ротора КВТ; нижня горизонтальна площадка – для кріплення заглушки зі штуцером для зливу оливи з перехідника; фланець – для кріплення труби відбору повітря з проточної частини на підпір масляних ущільнень задньої кришки опорного вінця СТ. Передбачені також штуцери для виміру, у разі необхідності, параметрів повітря в проточній частині та форсунки для промивання проточної частини.

Корпус КВТ є силовим. Корпус і закріплені в ньому напрямні апарати за своєю конструкцією аналогічні корпусу і напрямним апаратам КНТ, за винятком того, що КНТ – семиступінчатий, КВТ – дев'яноступеневий.

Ротор КВТ барабанно-дискової конструкції і складається з дев'яти дисків з лопатками. Конструкція дисків, їх з'єднання між собою і з цапфами аналогічне ротору КНТ.

Ротор КВТ встановлений на двох опорах. Передня опора – роликовий підшипник встановлений у перехіднику, сприймає радіальні навантаження ротора. Задня опора – роликовий і кульковий підшипники, де роликовий підшипник сприймає радіальні навантаження від ротора КВТ, кульковий підшипник сприймає різницю осьових зусиль від роторів КВТ і ТВТ.

Задній корпус являє собою кільцевий дифузор КЗ, в якому відбувається зниження швидкості потоку повітря перед входом в жарові труби і слугує для розміщення задньої опори ротора КВТ, напрямного апарату дев'ятого ступеня, напрямного апарату на виході з КВТ.

Задній корпус складається з двох основних вузлів: зовнішньої і внутрішньої стінок.

Напрямний апарат на виході з КВТ є силовим. Він зв'язує внутрішню стінку з зовнішньою. Кожна лопатка приєднана до внутрішньої стінки

дифузора, а полкою входить в паз зовнішнього кільця, запресованого у проточку зовнішньої стінки дифузора.

За своєю конструкцією, підведенню і зливу оливи задня опора ротора КВТ аналогічна передній опорі ротора КНТ.

Відмінною особливістю задньої опори ротора КВТ у порівнянні з передньою опорою КНТ є те, що в порожнину між першим від ротора підшипником і масловідбивачем через два отвори в корпусі подається свіжа олива для кращого охолодження підшипників і запобігання коксування оливи.

Олива до підшипників задньої опори підводиться по трубі, після надходить в колектор і по отворах у корпусі задньої опори надходить до трьох форсунок, через які подається до обох підшипників .

Ущільнення масляної порожнини з боку ротора КВТ проводиться за допомогою трирядного лабіринтного ущільнення. Гребінці лабіринтної втулки ротора КВТ і кришка задньої опори, утворюють ущільнення задньої опори КВТ. Повітря проникає з розвантажувальної порожнини КВТ зтраплюється через отвори в кришці в кільцеву порожнину і двома трубами зтраплювання відводяться під кожух газовідводу.

КЗ призначена для передачі тепла робочого тіла – повітря, що надходить з компресора, за рахунок безперервного спалювання в ньому, як в окислювачі, палива – природного газу.

За конструкцією КЗ є прямоочною трубчато-кільцевого типу. У місцях з'єднань кожуха КЗ з фланцями заднього корпусу КВТ і корпусу соплового апарату (СА) горизонтальні роз'єми ущільнюються за допомогою прокладок, що притискаються планками. Застосування такої конструкції дозволяє проводити огляд і заміну жарових труб в умовах експлуатації, без розбирання всього двигуна.

КЗ складається з: кожуха, десяти жарових труб, кожуха валу турбіни, десяти паливних форсунок, дифузора, колектора газового, десяти труб підведення газу, двох запалювачів.

Паливо – природний газ, підводиться в КЗ по кільцевому колектору, розташованого навколо корпусу КВТ.

ТВТ – осьова, реактивна, двоступенева. ТВТ приводить у рух КВТ. Кожний ступінь турбіни утворюється рядом соплових лопаток, закріплених у нерухомому корпусі СА і наступним за ним рядом робочих лопаток, закріплених на диску ротора.

ТВТ складається з СА першого ступеня, СА другого ступеня, ротора ТВТ і опорного вінця ТВТ.

СА першого ступеня складається з силового, зовнішнього та внутрішнього корпусів, соплових лопаток, зовнішніх і внутрішніх башмаків, екрану.

Ротор ТВТ складається з пустотілого вала, двох облопачених дисків, лабіринту, лабіринтної втулки і восьми секторів з лабіринтними гребінцями.

Вал турбіни з'єднаний з дисками в один нероздільний вузол за допомогою виступів, виконаних на дисках, і радіальних штифтів, що забезпечують можливість теплового розширення деталей, в радіальному напрямку при збереженні взаємного центрування.

Передньою опорою ротора ТВТ є задня опора ротора КВТ. У задній опорі ТВТ встановлено роликовий підшипник.

ТНТ – осьова, реактивна, двоступенева, складається з СА третього ступеня, СА четвертого ступеня, ротора, і опорного вінця ТНТ. ТНТ приводить у рух КНТ.

Вал ТНТ з'єднаний з внутрішнім валом КНТ і передає крутний момент від ротора ТНТ на ротор КНТ. Вал турбіни штифтами з'єднаний з дисками, що забезпечує можливість теплового розширення зпрямованих деталей, у радіальному напрямку, при збереженні взаємного центрування. Вал ТНТ має дві опори – передню і задню, в яких встановлено роликові підшипники.

СА третього ступеня складається з корпусу, пакетів лопаток і ущільнювального кільця. На СА передбачені зазори для можливості теплового розширення. У корпусі СА наявні технологічні отвори для огляду лопаток.

СТ – осьова, реактивна, двоступінчата, складається з опорного вінця ТНТ, СА першого ступеня, СА другого ступеня, опорного вінця СТ і ротора СТ.

СТ приводить у рух нагнітач. Обертання від ротора СТ передається на нагнітач ресорою і фрикційною муфтою.

Ротор має дві опори. Задня опора ротора СТ розміщена в опорному вінці СТ і складається з кулькового і роликового підшипників. Передня опора ротора СТ розміщена в опорному вінці ТНТ і являє собою роликовий підшипник.

Конструктивна схема ГТД-10В наведена на рис. 1.1.

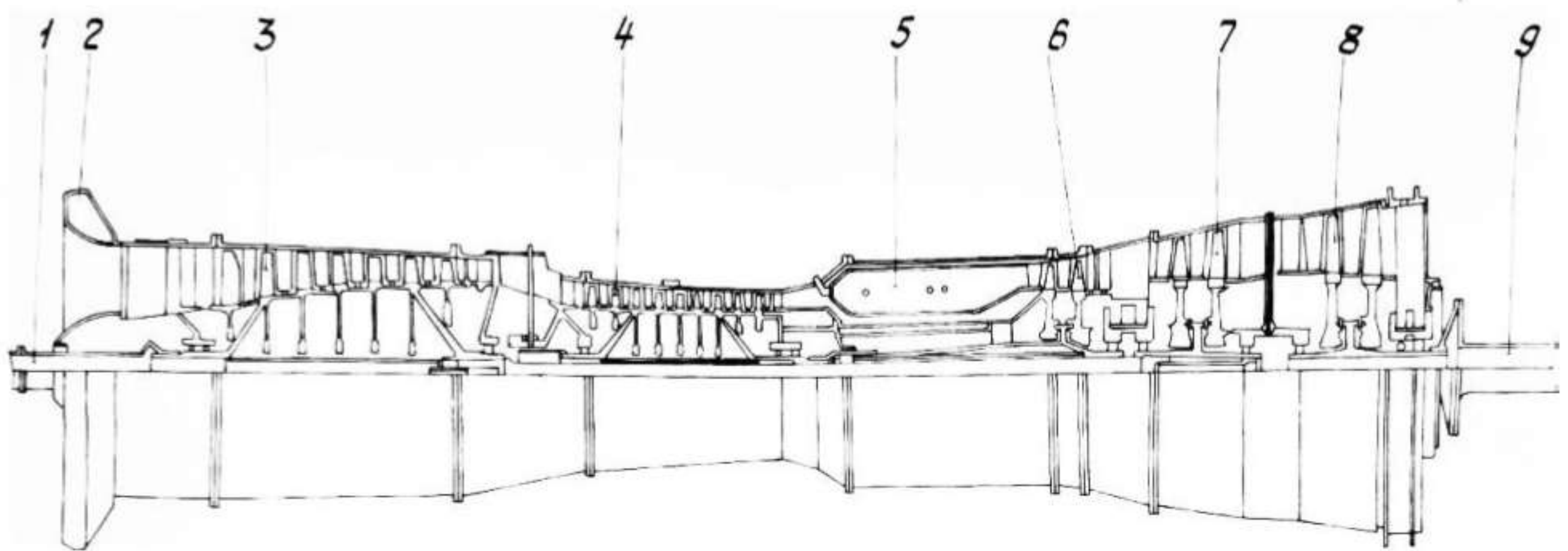


Рис. 1.1. Конструктивна схема ГТД-10В: 1 – ресора блока агрегатів;

2 – вхідний пристрій; 3 – КНТ; 4 – КВТ; 5 – КЗ; 6 – ТВТ;

7 – ТНТ; 8 – СТ; 9 – ресора.

1.3.2. Опис конструкції нагнітача типу ЦН 235-21-1

Нагнітач типу ЦН 235-21-1 (рис. 1.2) є турбомашиною відцентрового типу, призначений для стиснення природного газу на КС МГ, використовується у складі ГПА-10-01 на КС-3. Рух газу і підвищення тиску в проточній частині нагнітача відбувається за рахунок створення поля відцентрових сил у робочому колесі, що забезпечує рух газу від центра колеса до периферії і за рахунок перетворення кінетичної енергії газу у потенціальну [8].

Процес стиснення проходить наступним чином: газ із всмоктуючого трубопровода поступає у всмоктуючу камеру нагнітача, потім у перше робоче колесо, лопатковий дифузор, збірну кільцеву камеру і далі по нагнітаючому трубопроводі в трасу.

Система ущільнення нагнітача підтримує заданий перепад тиску оливи і газу в ущільнювальній порожнині.

До складу нагнітача входять циліндр (корпус) і пакет нагнітача.

Корпус нагнітача являє собою циліндр, який закривається кришкою. У кришці є канали підводу оливи на торцеве ущільнення, зливу загазованої оливи, зливу оливи з торцевих ущільнень. На кришці змонтовано патрубок, для відбору чистого газу з центру нагнітальної камери і канал для наддуву цього газу в кінцеве ущільнення. Канали кришки з'єднуються з відповідними каналами пакета і герметизуються ущільнювальними кільцями.

Пакет нагнітача складається з ротора, торцевих ущільнень, опорних підшипників, упорного вкладиша, вкладиша та гвинтового насосу.

Ротор нагнітача має два робочих колеса, розташованих між опорними шийками вала. До насадження робочих колес на вал, вони проходять статичне балансування, а ротор у зібраному вигляді – динамічне балансування. На кінцевих ділянках ротора наявні торцеві ущільнення, призначені для запобігання виходу газу з машини. Нагнітач оснащений двома ідентичними за конструкцією ущільненнями, які розміщуються між проточною частиною нагнітача і підшипниками. Протікання оливи через торцеву ущільнювальну пару направляються в злив, що запобігає потраплянню оливи на вал ротора.

Нагнітач двоступінчатий з тангенціальним підводом і відведенням газу. Патрубки корпуса нагнітача з внутрішнім діаметром 680 мм розташовані співвісно і з'єднуються з газопроводом зварюванням. Вся рухома і внутрішня статорна частина, які включають в себе ротор, підшипники, торцеві лабіринтні ущільнення, дифузори, зворотний напрямний апарат й інші елементи, виконані у вигляді пакета, встановленого в корпусі. Таке виконання нагнітача дозволяє при

необхідності виконувати швидкий ремонт чи заміну проточної частини за рахунок установки запасного пакета.

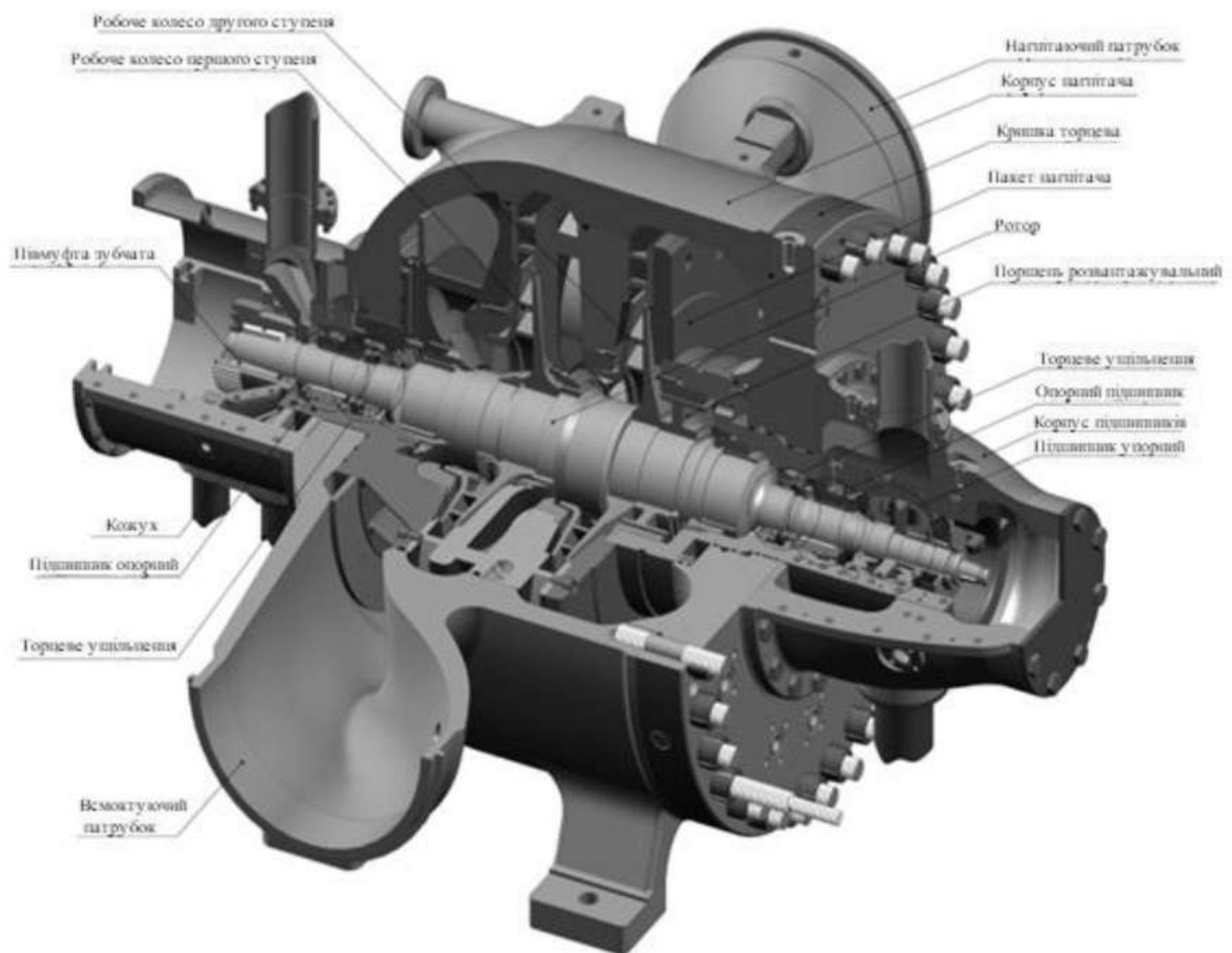


Рис. 1.2. Конструктивна схема нагнітача ЦН 235-21-1

Висновки за розділом

У розділі 1 наведено короткий опис компресорного цеху КС-3 Ромненської ГКС. Приведено основні технічні дані експлуатації КС-3 – загальна потужність, що складає сумарно 70 МВт та номінальна об’ємна продуктивність станції в 90 млн.м³ на добу. Описано основні технічні дані складових ГПА-10-01Е – газотурбінного приводу з двигуном ГТД-10В та відцентрового нагнітача типу ЦН 235-21-1 у складі ГПА. Наведено опис конструкції ГТД-10В та ЦН 235-21-1.

Розглянуто можливі шляхи модернізації ГПА на базі КС-3 та їх доцільність з точки зору енергозбереження. Наведено переваги двигуна ДН-70 над ДР59Л за основними технічними показниками та результати дослідно-промислової експлуатації ГПА-10-МН70 з приводом від ДН-70, яким було замінено ГПА-10-01 під час першої модернізації ГПА №5 КС-3 у 2005 році.

Описано заходи виконані при повторній модернізації ГПА №5 КС-3 з заміною ГПА-10МН70 на блок ГПА-10-01Е з ГТД-10В. Приведено комплекс основних технологічних рішень реконструкції елементів зовнішніх підключень, систем та елементів ГПА, передбачених проектом модернізації ГПА-10МН70 на КС-3. Проведено порівняльний аналіз основних технічних даних двигуна ДН-70 і ГТД-10В.

Розглянуто метод модернізації ГПА шляхом заміни АПО оливи та проаналізовано його відповідність сучасним вимогам з енергозбереження. Приведено основні технологічні рішення проекту капітального ремонту систем охолодження оливи на ГПА-10-01 №5 КС-3 Ромненської ГКС. Описано конструкцію запроєктованих АПО оливи АПОО210.8.6,5к-ПМ2 та їх переваги у використанні, щодо існуючих апаратів АПО оливи типу 06-10.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КС-3 м. РОМНИ

Аналіз ефективності роботи КС-3, проводимо визначивши ефективність роботи проточної частини нагнітача ЦН 235-21-1, порівнюючи адіабатичну та політропну роботи стиснення природного газу в решітці ротора нагнітача. Вихідними даними для розрахунку є робочі параметри нагнітача. На основі розрахунків зробимо висновок про ефективність роботи нагнітача.

2.1. Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу

При виконанні розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу оперують термінами «стандартні», «нормальні» та «робочі умови».

Стандартні умови – це температура і тиск природного газу, до яких зводяться об'єми газу при комерційних взаєморозрахунках, а саме: $T_{ст} = 293 \text{ К}$ (в європейських країнах $T_{ст} = 273 \text{ К}$ або 288 К) та $P_{ст} = 101325 \text{ Па}$.

Нормальні умови – умови, за яких температура природного газу $T_{норм} = 273 \text{ К}$, а тиск $P_{норм} = 101325 \text{ Па}$ [9].

Фізико-хімічні властивості розраховуємо для природного газу, згідно рекомендацій [9], що відповідає компонентному складу газу, який транспортується МГ «Слець – Кременчук – Кривий Ріг». Компонентний склад газу наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Компонентний склад газу

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}	O_2	N_2	CH_2
Об'ємна частка, %	95,283	2,692	0,838	0,253	0,041	0,015	0,003	0,064	0,234

Питома ізобарна теплоємність природного газу C_p визначається сумою добутку питомої ізобарної теплоємності кожного компонентів газу C_{pi} на частку відповідного компонента в газі r_i [10]:

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{pi} \cdot r_i. \quad (2.1)$$

Питома ізохорна теплоємність природного газу C_v визначається сумою добутку питомої ізохорної теплоємності кожного компоненту газу C_{vi} на частку відповідного компонента в газі r_i :

$$C_v = \sum_{i=1}^n C_{vi} \cdot r_i, \quad (2.2)$$

де r_i – об’ємна частка відповідного компоненту в газі.

Питому ізобарну C_p та ізохорну C_v теплоємність визначимо для природного газу заданого компонентного складу, значення C_{pi} та C_{vi} для відповідних компонентів приймаємо рівними відповідно до [11], за формулами (2.1) та (2.2):

$$C_p = \frac{2166 \cdot 95,283 + 1647 \cdot 2,692 + 1550 \cdot 0,838 + 1592 \cdot 0,253 + 1593 \cdot 0,041}{100\%} +$$

$$+ \frac{1602 \cdot 0,015 + 914,86 \cdot 0,003 + 1039 \cdot 0,640 + 814,79 \cdot 0,234}{100\%} = 2134 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

$$C_v = \frac{1648 \cdot 95,283 + 1370 \cdot 2,692 + 1362 \cdot 0,838 + 1451 \cdot 0,253 + 1479 \cdot 0,041}{100\%} +$$

$$+ \frac{1507 \cdot 0,015 + 626,375 \cdot 0,003 + 741,099 \cdot 0,640 + 626,375 \cdot 0,234}{100\%} = 1629 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

Визначаємо показник адіабати:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2134}{1629} = 1,31.$$

Розрахуємо густину газу заданого компонентного складу, за нормальних умов:

$$\rho_n = \frac{\mu_r}{V_m}, \quad (2.3)$$

де ρ_n – густина газу за нормальних умов, кг/м³;

μ_r – молярна маса газу за нормальних умов, кг/кмоль;

V_m – молярний об'єм за нормальних умов, м³/кмоль.

Молярна маса газу μ_r при нормальних умовах визначається сумою добутку молярної маси кожного компоненту газу μ_i на частку відповідного компонента в газі r_i :

$$\mu_r = \sum_{i=1}^m \mu_i \cdot r_i. \quad (2.4)$$

Густину газу за нормальних умов визначимо за формулою (2.3) використавши формулу (2.4):

$$\rho_n = \frac{16 \cdot 95,283 + 30 \cdot 2,692 + 44 \cdot 0,838 + 58 \cdot 0,253 + 72 \cdot 0,041 + 86 \cdot 0,015}{22,4 \cdot 100\%} + \frac{+ 32 \cdot 0,003 + 28 \cdot 0,640 + 44 \cdot 0,234}{22,4 \cdot 100\%} = 0,754 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right)$$

Визначимо густину газу за стандартних умов:

$$\rho_{\text{ст}} = \rho_{\text{н}} \cdot \frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{ст}}} = 0,754 \cdot \frac{273}{293} = 0,703 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$$

Відносна густина газу, відносно повітря, за стандартних умов:

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{пов}}} = \frac{0,703}{1,2047} = 0,583,$$

де $\rho_{\text{пов}} = 1,2047 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за стандартних умов.

Газова стала природного газу $R_{\text{г}}$ визначається сумою добутку питомої газової сталої кожного компонента газу R_i на частку відповідного компонента в газі r_i :

$$R_{\text{г}} = \sum_{i=1}^n R_i \cdot r_i. \quad (2.5)$$

Відповідно до формули (2.5):

$$R_{\text{г}} = \frac{519,4 \cdot 95,283 + 276,5 \cdot 2,692 + 188,7 \cdot 0,838 + 146,7 \cdot 0,253 + 115,3 \cdot 0,041}{100\%} + \frac{96,5 \cdot 0,015 + 259,7 \cdot 0,003 + 296,9 \cdot 0,640 + 189 \cdot 0,234}{100\%} = 506,75 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

Результати розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу заносимо до табл. 2.2.

Фізико-хімічні властивості природного газу

Показник	Розмірність	Величина
C_p	Дж/кг·К	2134
C_v	Дж/кг·К	1629
k	-	1,31
ρ_n	кг/м ³	0,754
$\rho_{ст}$	кг/м ³	0,703
$\Delta_{ст}$	-	0,583
R_r	Дж/кг·К	506,75

За допомогою програмного середовища MathCAD, розробляємо програму розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу, відповідного компонентного складу (додаток А).

2.2. Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 235-21-1

Стиснення газу в нагнітачі відбувається за наявності тертя і теплообміну, тому підпорядковується рівнянню адіабати. Зміну стану газу в окремих частинах нагнітача, можна достатньо точно описати рівнянням політропи. Процес стиснення газу в різній степені відхиляється від адіабатичного, в різних частинах елементів нагнітача, тобто проходить з різним показником політропи. При дослідженні процесу в цілому, користуються середнім показником політропи. Таким же методом користуються і при графічному зображенні процесу. При цьому потрібно пам'ятати, що процес, який відповідає цьому середньому показнику, співпадає з дійсним процесом у початковому та кінцевому станах [11].

Процес стиснення природного газу розглянемо при параметрах роботи нагнітача ЦН 235-21-1, що експлуатується на КС-3.

Робочі параметри:

- температура всмоктування газу – $T_{bc}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура нагнітання газу – $T_n=44,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- абсолютний тиск всмоктування газу – $P_{bc}= 53,48\text{ атм}$;
- абсолютний тиск нагнітання газу – $P_n=68,35\text{ атм}$.

Зобразимо баланс роботи нагнітача в T-S координатах, для визначення показника політропи. У діапазоні температур $T = 273...319\text{ К}$, з урахуванням температур всмоктування та нагнітання $T_{bc} = 22,2 + 273 = 295,2\text{ К}$, $T_n = 44,5 + 273 = 317,5\text{ К}$, обчислюємо значення ентропії для відповідних значень температури, при сталих тиску нагнітання $P_n = \text{const}$ та тиску всмоктування $P_{bc} = \text{const}$, за формулами:

$$S_{bc} = C_v \cdot \ln\left(\frac{T^k}{P_{bc}^{k-1}}\right) \quad (2.6)$$

$$S_n = C_v \cdot \ln\left(\frac{T^k}{P_n^{k-1}}\right) \quad (2.7)$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Результати розрахунку ентропії ізобарних процесів

T, К	$S_{bc}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$S_n, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
273	4148	4024
275	4163	4039
277	4179	4055
279	4194	4070
281	4209	4085
283	4225	4101

285	4240	4116
287	4254	4131
289	4269	4145
291	4284	4160
293	4299	4175
295	4313	4189
295,2	4315	4191
297	4328	4204
299	4342	4218
301	4356	4232
303	4370	4246
305	4384	4260
307	4398	4274
309	4412	4288
311	4426	4302
313	4440	4316
315	4453	4329
317	4467	4343
317,5	4470	4346
319	4480	4356

Графічне зображення балансу роботи нагнітача в T-S координатах зображено на рис. 2.1.

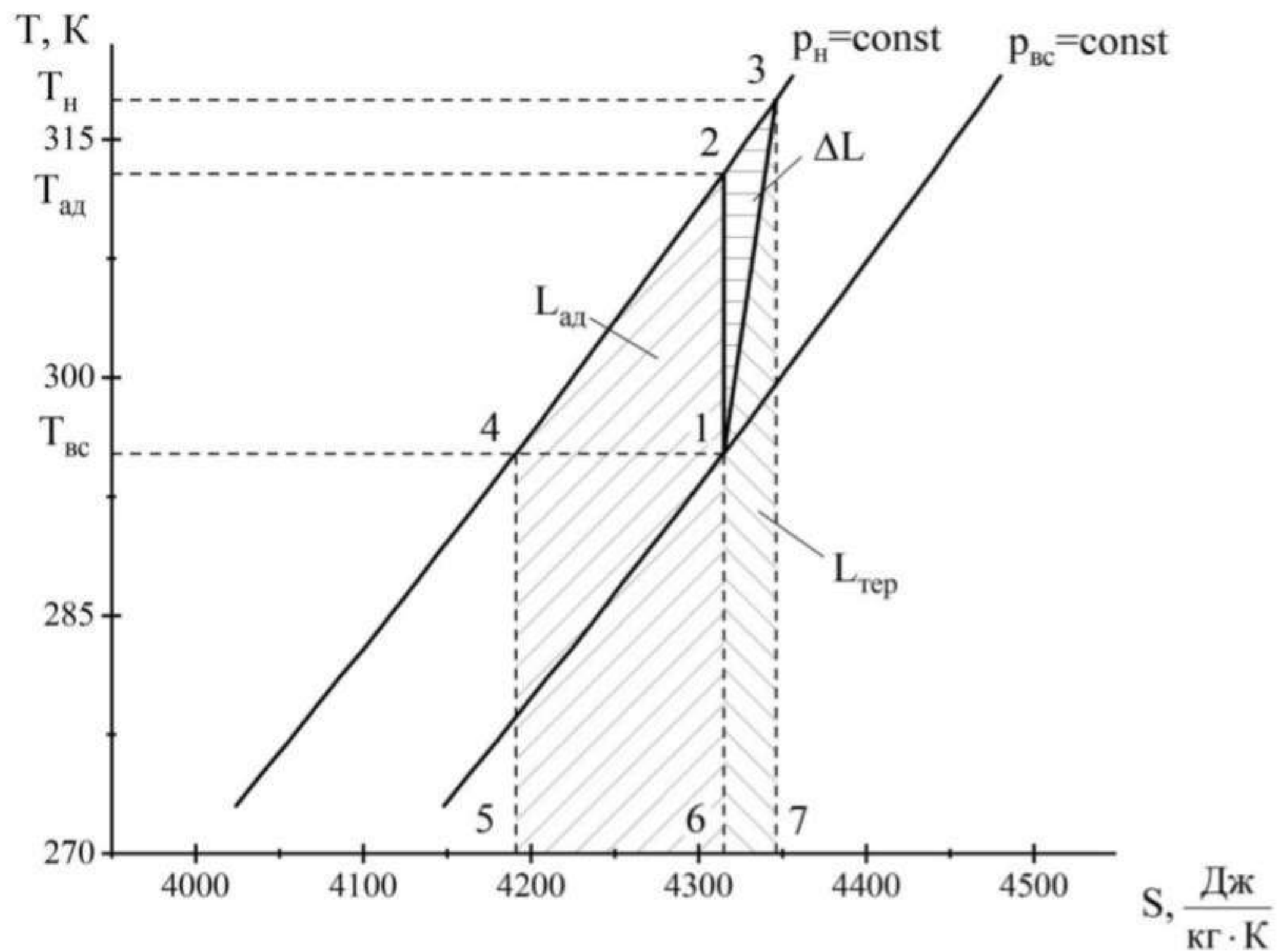


Рис. 2.1. Баланс роботи нагнітача ЦН 235-21-1

Лінією 1-2 зображено ідеальний (адіабатичний) процес стиснення газу в нагнітачі, де точка 1 відповідає параметрам газу на вході в нагнітач, а точка 2 характеризує стан газу на виході з нагнітача при адіабатичному стисканні. Дійсний процес стискання проходить з втратами і відповідає політропі 1-3 зі збільшенням ентропії [12].

Питома адіабатична робота стиснення $L_{ад}$, на рис. 2.1., відповідає площі фігури під кривою $p_n=const$ в межах 5-4-2-1-6. Питома робота теплового опору ΔL еквівалентна площі фігури 1-2-3. Сума питомих адіабатичної роботи стиснення $L_{ад}$ та роботи теплового опору ΔL , дорівнює питомій політропній роботі стиснення $L_{пол}$ і рівна площі фігури 5-4-2-3-1-6. Питома робота тертя $L_{тер}$, на рис. 2.1, еквівалентна площі фігури 6-1-3-7.

Адіабатичну температуру нагнітання $T_{н.ад}$ знаходимо за формулою :

$$T_{н.ад} = \left(e^{\frac{S_{всТвс}}{C_V}} \cdot P_H^{k-1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (2.8)$$

де $S_{всТвс}$ – ентропія газу, визначена за температури та тиску всмоктування, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Відповідно до формули (2.8):

$$T_{н.ад} = \left(e^{\frac{4315}{1629}} \cdot (6,835 \cdot 10^6)^{1,31-1} \right)^{\frac{1}{1,31}} = 312,846 \text{ (К)}.$$

Отриману фігуру на T-S діаграмі розіб'ємо на прості елементи і обчислимо площі, що еківалентні значенням роботи, як суму відповідних простих фігур (рис. 2.2).

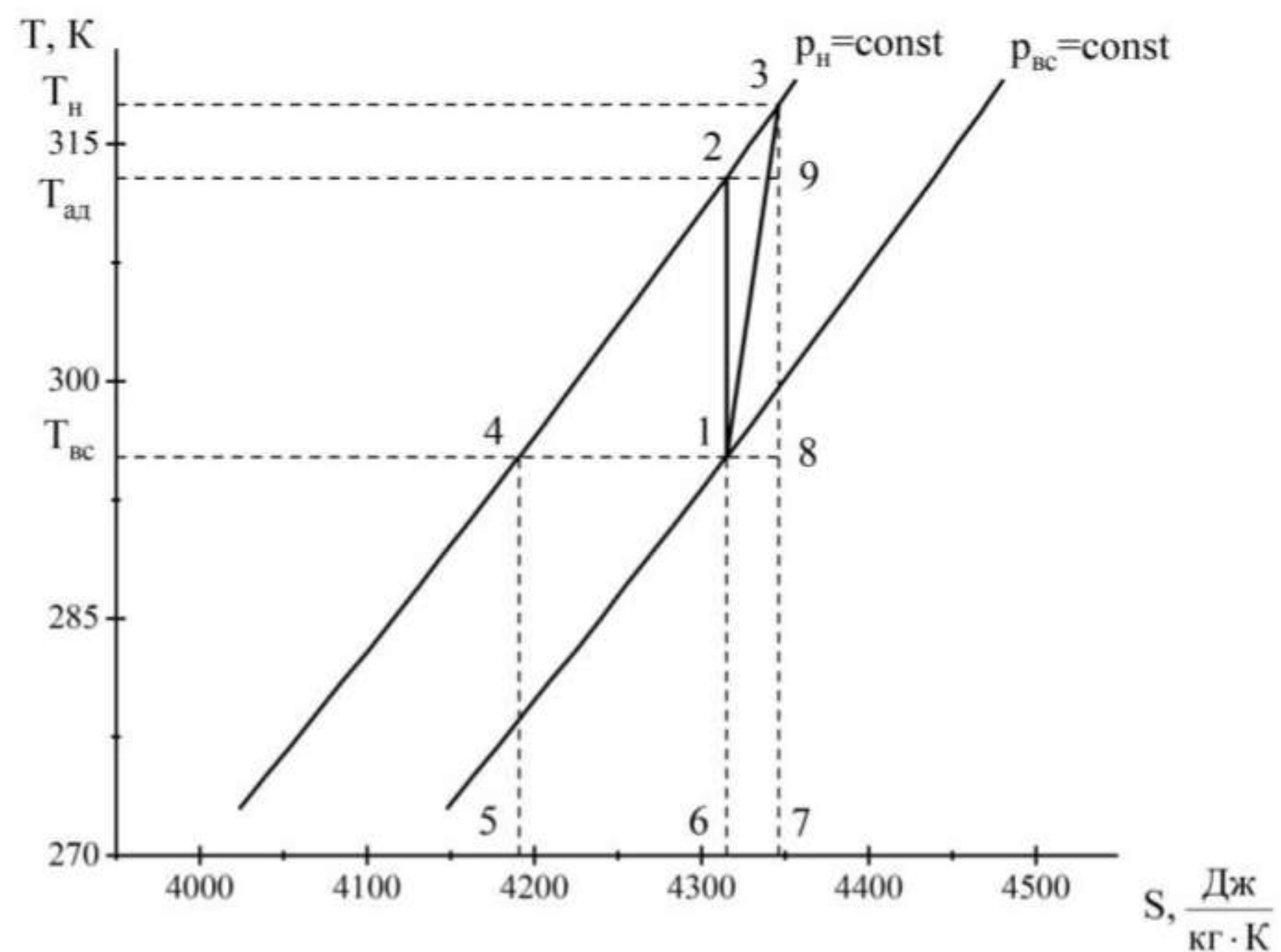


Рис. 2.2. Схема розбиття на прості фігури

Опираючись на раніше визначені відповідності значень роботи і фігур на діаграмі T-S, визначаємо площі цих фігур, як суми площ простих фігур виражаючи в теплових одиницях.

Площу фігури 5-4-1-6 позначимо A_1 визначимо, як площу прямокутника:

$$A_1 = (S_{всT_{вс}} - S_{нT_{вс}}) \cdot T_{вс}, \quad (2.9)$$

де $S_{нT_{вс}}$ – значення ентропії при температурі всмоктування та тиску нагнітання, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

За формулою (2.9):

$$A_1 = (4315 - 4191) \cdot 295,2 = 36580 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Площу елемента 6-1-8-7 позначимо A_2 і знаходимо, як площу прямокутника:

$$A_2 = (S_{пT_{н}} - S_{всT_{вс}}) \cdot T_{вс}, \quad (2.10)$$

де $S_{пT_{н}}$ – значення ентропії при температурі та тиску нагнітання, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
 $S_{всT_{н}}$ – значення ентропії при температурі нагнітання та тиску всмоктування, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

За формулою (2.10):

$$A_2 = (4346 - 4315) \cdot 295,2 = 9304 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Площу фігури 4-2-1 позначимо A_3 і знайдемо, як площу прямокутного трикутника:

$$A_3 = \frac{1}{2} \cdot (S_{всT_{вс}} - S_{нT_{вс}}) \cdot (T_{н.ад} - T_{вс}), \quad (2.11)$$

Відповідно до формули (2.11):

$$A_3 = \frac{1}{2} \cdot (4315 - 4191) \cdot (312,846 - 295,2) = 1093 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Площу елемента 1-2-9-8 позначимо A_4 і обчислимо, як площу прямокутника:

$$A_4 = (S_{\Pi T_H} - S_{\text{вс}T_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\text{п.ад}} - T_{\text{вс}}), \quad (2.12)$$

Згідно формули (2.12):

$$A_4 = (4346 - 4315) \cdot (312,846 - 295,2) = 556,182 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Площу фігури 2-3-9 позначимо A_5 і знайдемо, як площу прямокутного трикутника:

$$A_5 = \frac{1}{2} \cdot (S_{\Pi T_H} - S_{\text{вс}T_{\text{вс}}}) \cdot (T_H - T_{\text{п.ад}}), \quad (2.13)$$

Площа A_5 за формулою (2.13):

$$A_5 = \frac{1}{2} \cdot (4346 - 4315) \cdot (317,5 - 312,846) = 73,346 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Позначимо A_6 площу елемента 1-9-8 і обчислимо, як площу прямокутного трикутника:

$$A_6 = \frac{1}{2} \cdot (S_{\Pi T_H} - S_{\text{вс}T_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\Pi} - T_{\text{вс}}), \quad (2.14)$$

Визначимо площу A_6 відповідно до формули (2.14):

$$A_6 = \frac{1}{2} \cdot (4346 - 4315) \cdot (317,5 - 295,2) = 351,437 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Питома адіабатична робота $L_{ад}$ з діаграми T-S дорівнює сумі площ фігур A_1 та A_3 :

$$L_{ад} = A_1 + A_3 = 36580 + 1093 = 37670 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right). \quad (2.15)$$

Питома робота теплового опору ΔL визначиться через площі фігур A_4 , A_5 , A_6 :

$$\Delta L = A_4 + A_5 - A_6 = 556,182 + 73,346 - 351,437 = 278,091 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right). \quad (2.16)$$

Питома політропна робота стиснення $L_{пол}$ дорівнює сумі питомої адіабатичної роботи стиснення $L_{ад}$ та питомої роботи теплового опору ΔL :

$$L_{пол} = L_{ад} + \Delta L = 37670 + 278,091 = 37950 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right) \quad (2.17)$$

Питома робота сил тертя дорівнює сумі площ фігур A_2 та A_6 :

$$L_{тер} = A_2 + A_6 = 9304 + 351,437 = 9656 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right) \quad (2.18)$$

Питома ефективна робота нагнітача:

$$L_{еф} = L_{ад} + \Delta L + L_{тер} = 37670 + 278,091 + 9656 = 47610 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right) \quad (2.19)$$

Знайдемо значення політропного та адіабатичного ККД нагнітача:

$$\eta_{\text{пол}} = \frac{L_{\text{пол}}}{L_{\text{еф}}} \cdot 100\% = \frac{37950}{47610} \cdot 100\% = 79,7\%; \quad (2.20)$$

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{L_{\text{ад}}}{L_{\text{еф}}} \cdot 100\% = \frac{37670}{47610} \cdot 100\% = 79,1\%. \quad (2.21)$$

Показник політропи визначимо за формулою [12]:

$$n = \frac{L_{\text{пол}}}{L_{\text{пол}} - R_{\text{г}} \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{вс}})}, \quad (2.22)$$

Відповідно до формули (2.22), показник політропи процесу стиснення в нагнітачі:

$$n = \frac{37950}{37950 - 506,75 \cdot (317,5 - 295,2)} = 1,424.$$

У програмному середовищі Mathcad, розробляємо програму розрахунку показника політропи процесу стиснення в решітці ротора нагнітача (Додаток Б).

2.3. Розрахунок добових значень показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 235-21-1

Вихідні дані для визначення добових значень показника політропи беремо з розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу. Значення добових робочих параметрів роботи нагнітача ЦН 235-21-1 візьмемо з добової відомості роботи ГПА-10-01Е і занесемо в табл. 2.4.

Робочі параметри нагнітача на протязі доби

t, год	$T_{вс}$, К	$T_{п}$, К	$P_{вс}$, МПа	$P_{п}$, МПа
1:00	25,1	48,7	5,02	6,51
2:00	25,1	48,7	5,10	6,57
3:00	25,1	48,7	5,10	6,58
4:00	25,1	48,7	5,15	6,63
5:00	25,1	48,7	5,17	6,66
6:00	25,1	48,7	5,19	6,68
7:00	25,1	48,7	5,20	6,70
8:00	25,1	48,7	5,21	6,72
9:00	25,1	48,7	5,22	6,74
10:00	25,1	48,7	5,23	6,75
11:00	25,1	48,7	5,22	6,75
12:00	25,1	48,7	5,21	6,74
13:00	25,1	48,7	5,20	6,74
14:00	25,1	48,7	5,19	6,73
15:00	25,1	48,7	5,16	6,70
16:00	25,1	48,7	5,14	6,68
17:00	25,1	48,7	5,13	6,66
18:00	25,1	48,7	5,13	6,65
19:00	25,1	48,7	5,12	6,64
20:00	25,1	48,7	5,11	6,63
21:00	25,1	48,7	5,11	6,63
22:00	25,1	48,7	5,10	6,62
23:00	25,1	48,7	5,10	6,62
24:00	25,1	48,7	5,10	6,62

Аналогічно до розрахунку показника політропи наведеного вище розраховуємо значення ентропії в діапазоні температур $T = 273...323$ К, для характерних точок процесу стиснення, що необхідні для визначення добових значень показника політропи. Значення ентропії визначаємо за формулами (2.6), (2.7):

$$S_1 = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_{bc}^k}{P_{bc}^{k-1}} \right);$$

$$S_2 = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_{bc}^k}{P_H^{k-1}} \right);$$

$$S_3 = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_{II}^k}{P_{II}^{k-1}} \right);$$

Значення адіабатичної температури нагнітання визначимо за формулою (2.8), вона набуде вигляду:

$$T_{H,ад} = \left(e^{\frac{S_1}{C_v}} \cdot P_H^{k-1} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Графічним методом, аналогічно до раніше проведеного розрахунку, визначаємо площі відповідних фігур. Формули (2.9) – (2.14) набудуть вигляду:

$$A_1 = (S_1 - S_2) \cdot T_{bc};$$

$$A_2 = (S_3 - S_1) \cdot T_{bc};$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \cdot (S_1 - S_2) \cdot (T_{H,ад} - T_{bc});$$

$$A_4 = (S_3 - S_1) \cdot (T_{H,ад} - T_{bc});$$

$$A_5 = \frac{1}{2} \cdot (S_3 - S_1) \cdot (T_H - T_{H,ад});$$

$$A_6 = \frac{1}{2} \cdot (S_3 - S_1) \cdot (T_H - T_{bc}).$$

Результати розрахунків ентропії заносимо в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Результати розрахунків значень ентропії та площ фігур

t, год	$T_{н.ад}$	S_1	S_2	S_3	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1:00	310,5	4367	4236	4399	38330	10900	1216	11590	102,2	447,8
2:00	310,0	4359	4232	4394	37360	11870	1154	12610	121,3	488,0
3:00	310,2	4359	4231	4393	37580	11650	1168	12370	116,7	478,8
4:00	310,0	4355	4227	4390	37260	11970	1148	12710	123,3	492,0
5:00	310,0	4353	4225	4387	37350	11880	1153	12610	121,3	488,1
6:00	310,0	4351	4223	4386	37220	12010	1146	12740	123,9	493,4
7:00	310,1	4350	4222	4384	37380	11850	1155	12580	120,7	486,9
8:00	310,1	4349	4220	4383	37540	11690	1165	12420	117,6	480,5
9:00	310,2	4348	4219	4381	37690	11540	1175	12260	114,5	474,1
10:00	310,2	4347	4218	4381	37630	11600	1171	12320	115,7	476,7
11:00	310,3	4348	4218	4381	37910	11320	1189	12030	110,2	465,1
12:00	310,4	4349	4219	4381	37980	11250	1173	11960	109,0	462,5
13:00	310,5	4350	4219	4381	38260	10970	1211	11660	103,6	450,8
14:00	310,5	4351	4219	4382	38320	10910	1215	11600	102,4	448,2
15:00	310,6	4354	4222	4384	38520	10710	1228	11390	98,7	440,1
16:00	310,7	4356	4223	4386	38650	10580	1236	11250	96,3	434,7
17:00	310,6	4357	4225	4387	38500	10730	1226	11420	99,2	441,1
18:00	310,5	4357	4225	4388	38280	10950	1212	11650	103,3	450,2
19:00	310,5	4357	4226	4389	38340	10890	1216	11580	102,0	447,5
20:00	310,6	4358	4227	4390	38410	10820	1221	11510	100,8	444,8
21:00	310,6	4358	4227	4390	38410	10820	1221	11510	100,8	444,8
22:00	310,6	4359	4228	4390	38470	10760	1225	11440	99,6	442,0
23:00	310,6	4359	4228	4390	38470	10760	1225	11440	99,6	442,0
24:00	310,6	4359	4228	4390	38470	10760	1225	11440	99,6	442,0

Значення питомих адіабатичної роботи $L_{ад}$, роботи теплового опору ΔL , політропної роботи $L_{пол}$, роботи сил тертя $L_{тер}$ визначаємо аналогічно до розрахунку показника політропи, проведеного раніше, за формулами (2.15) – (2.19):

$$L_{ад} = A_1 + A_3;$$

$$\Delta L = A_4 + A_5 - A_6;$$

$$L_{пол} = L_{ад} + \Delta L;$$

$$L_{тер} = A_2 + A_6;$$

Знайдемо значення політропного та адіабатичного ККД нагнітача за формулами (2.20), (2.21):

$$\eta_{пол} = \frac{L_{пол}}{L_{еф}} \cdot 100\%.$$

$$\eta_{ад} = \frac{L_{ад}}{L_{еф}} \cdot 100\%.$$

Показник політропи розрахуємо за формулою (2.22):

$$n = \frac{L_{пол}}{L_{пол} - R_{г} \cdot (T_{п} - T_{вс})}.$$

Результати розрахунків занесемо до табл. 2.6.

Добові значення величин роботи та показника політропи

t, ГОД	n	$L_{ад}$, $\frac{Дж}{кг}$	ΔL , $\frac{Дж}{кг}$	$L_{пол}$, $\frac{Дж}{кг}$	$L_{гер}$, $\frac{Дж}{кг}$	$\eta_{ад}$, %	$\eta_{пол}$, %
1:00	1,439	39550	345,6	39900	11340	77.188	77.862
2:00	1,455	38510	366,7	38880	12360	75.158	75.873
3:00	1,451	38750	362,0	39110	12130	75.623	76.329
4:00	1,457	38400	368,8	38770	12460	74.954	75.674
5:00	1,455	38510	366,8	38870	12370	75.149	75.865
6:00	1,458	38370	369,4	38740	12500	74.886	75.607
7:00	1,455	38540	366,2	38900	12340	75.211	75.926
8:00	1,452	38700	362,9	39070	12170	75.535	76.243
9:00	1,449	38870	359,6	39230	12010	75.858	76.559
10:00	1,450	38800	361,0	39160	12080	75.726	76.430
11:00	1,446	39100	354,9	39460	11780	76.311	77.004
12:00	1,445	39150	353,5	39500	11720	76.435	77.125
13:00	1,440	39470	347,3	39820	11420	77.032	77.710
14:00	1,439	39540	345,8	39890	11350	77.167	77.842
15:00	1,435	39750	341,4	40090	11150	77.574	78.241
16:00	1,433	39890	338,4	40230	11010	77.848	78.508
17:00	1,436	39720	341,9	40070	11170	77.526	78.193
18:00	1,439	39490	346,9	39830	11400	77.066	77.743
19:00	1,438	39560	345,4	39900	11340	77.203	77.877
20:00	1,437	39630	343,9	39970	11270	77.340	78.011
21:00	1,437	39630	343,9	39970	11270	77.340	78.011
22:00	1,436	39700	342,4	40040	11200	77.477	78.146
23:00	1,436	39700	342,4	40040	11200	77.477	78.146
24:00	1,436	39700	342,4	40040	11200	77.477	78.146

Зміну питомих адіабатичної і політропної робіт, на протязі доби, зобразимо на графіку (рис. 2.3).

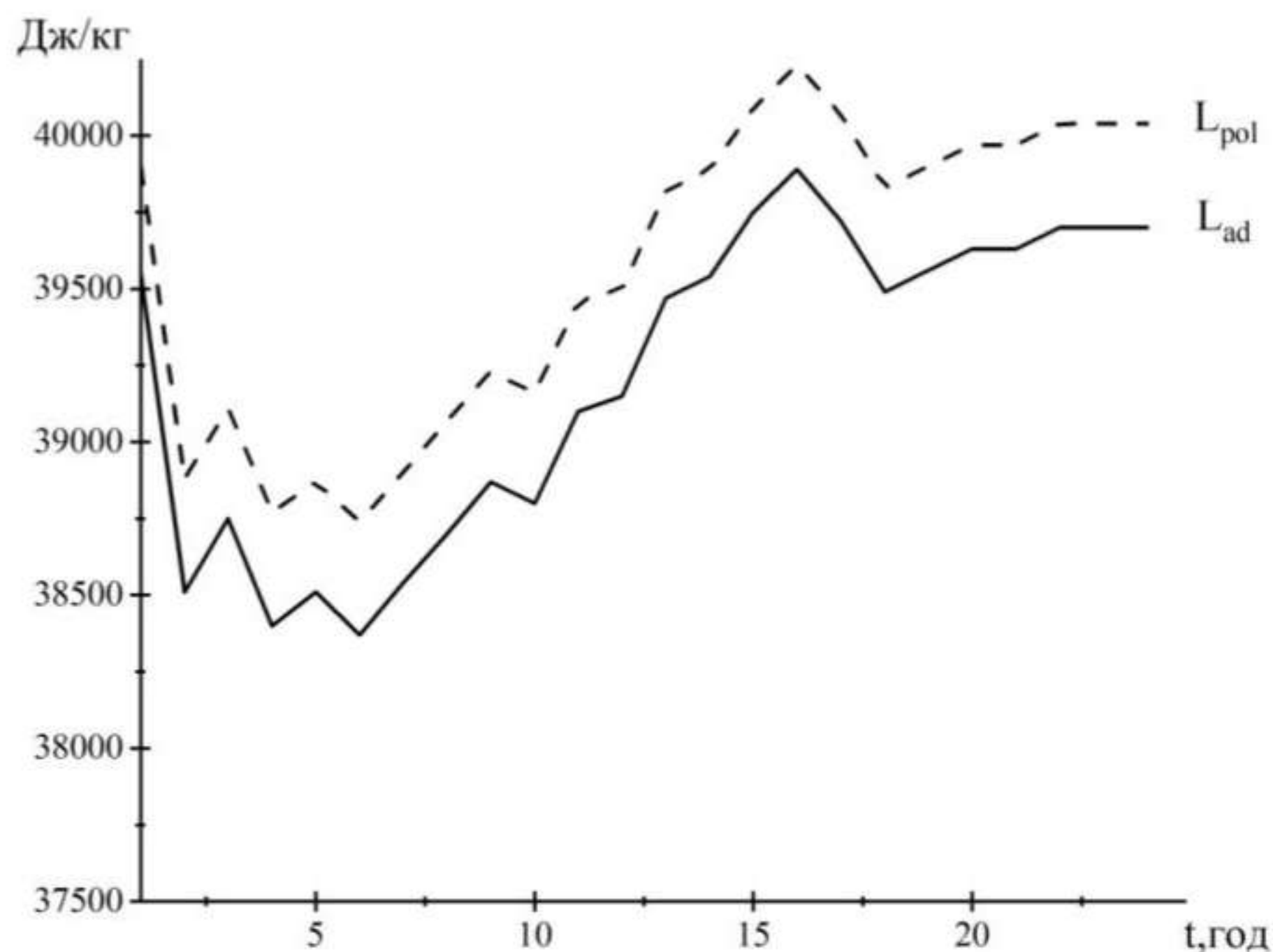


Рис. 2.3. Зміна питомих адіабатичної та політропної робіт на протязі доби

Для подолання гідравлічних втрат, під час стиснення природного газу, потрібно затратити більшу кількість роботи – робота теплового опору, що призводить до зайвих витрат палива. Оскільки робота теплового опору переходить в тепло, яке не має цільового використання та знімається, після процесу компримування, на АПО природного газу, що збільшує використання електроенергії, то для зменшення витрат електроенергії пропонується встановлення нових АПО оливи ГПА, з запровадженням частотним регулюванням обертів вентиляторів, що приведе до зменшення неефективних витрат енергії.

Адаптуємо розроблену програму розрахунку в програмному середовищі MathCAD значення показника політропи процесу стиснення природного газу в решітці ротора ВЦН (Додаток В).

2.4. Розрахунок параметрів роботи АПО

У теплообмінному апараті відбувається процес передачі теплоти від одного теплоносія до іншого. На КС експлуатуються поверхневі рекуперативні апарати. Для розрахунку коефіцієнта теплопередачі, використаємо паспортні дані АПО. В якості «холодного» теплоносія, в АПО оливи, використано повітря, що має температуру $t'_n = 40$ °С на вході в теплообмінний апарат. Абсолютний тиск повітря на виході з вентилятора АПО $P_n = 1,038$ атм [13]. Сумарна номінальна витрата повітря чотирма вентиляторами АПО $G_n = 53360$ м³/год. У системі змащення двигуна використовується олива МС-8, що надходить в АПО з температурою $t'_m = 65$ °С і має густину за даної температури $\rho_m = 848$ кг/м³. Питома ізобарна теплоємність оливи МС-8 дорівнює $C_p^m = 2035$ Дж/кг·К. Витрата оливи згідно паспорту АПО $G_m = 37,8$ м³/год. Потужність тепловідбору становить $Q_m = 290$ кВт.

Визначимо масову витрату оливи за одиницю часу:

$$G_m^m = \frac{G_m \cdot \rho_m}{3600} = \frac{37,8 \cdot 848}{3600} = 8,904 \text{ (кг/с)}.$$

Запишемо рівняння теплового потоку з урахуванням прийнятих позначень:

$$Q_m = G_m^m \cdot C_p^m \cdot (t'_{2m} - t''_{2m}). \quad (2.23)$$

Тоді значення температури оливи на виході з АПО визначаємо з рівняння (2.23):

$$t''_m = t'_m - \frac{Q_m}{G_m^m \cdot C_p^m} = 65 - \frac{290 \cdot 10^3}{8,904 \cdot 2035} = 49 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Масова секундна витрата повітря АПО:

$$G_{\Pi}^M = \frac{G_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}}{3600} = \frac{53360 \cdot 1,132}{3600} = 16,783 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right),$$

де $\rho_{\Pi} = 1,132$ – густина повітря на виході з вентилятора при 40°C , $\text{кг}/\text{м}^3$;

Температуру охолоджуваного повітря визначаємо з рівняння теплового балансу [13]:

$$Q_M = G_M^M \cdot C_p^M \cdot (t'_{2M} - t''_{2M}) = G_{\Pi}^M \cdot C_p^{\Pi} \cdot (t''_{\Pi} - t'_{\Pi}). \quad (2.24)$$

Тоді з формули (2.24):

$$t''_{\Pi} = t'_{\Pi} + \frac{Q_M}{G_{\Pi}^M \cdot C_p^{\Pi}} = 40 + \frac{290 \cdot 10^3}{16,783 \cdot 1237} = 54 \text{ } (^{\circ}\text{C}).$$

Визначимо значення температурного напору, як для теплообмінника перехресного току теплоносіїв [15]:

$$\Delta t = \frac{\theta_{\delta} - \theta_M}{\ln\left(\frac{\theta_{\delta}}{\theta_M}\right)} \cdot \varepsilon, \quad (2.25)$$

де θ_{δ} і θ_M – більший та менший температурні напори між теплоносіями на вході та виході з теплообміннику, $^{\circ}\text{C}$;

ε – поправка на перехресність потоків у теплообміннику.

Знаходимо температурні напори за формулами:

$$\theta_{\delta} = t'_{\text{м}} - t''_{\text{п}} = 65 - 54 = 11 \text{ (}^{\circ}\text{C)};$$

$$\theta_{\text{м}} = t''_{\text{м}} - t'_{\text{п}} = 49 - 40 = 9 \text{ (}^{\circ}\text{C)}.$$

Знаходимо коефіцієнт поправки на перехресність потоків у теплообміннику:

$$\varepsilon = 1 - 0,022 \cdot e^{\frac{t'_{\text{м}} - t''_{\text{м}}}{t'_{\text{м}} - t''_{\text{п}}}} = 1 - 0,022 \cdot e^{\frac{65 - 49}{65 - 54}} = 0,906.$$

Маючи розраховані параметри, визначаємо температурний напір за формулою (2.25):

$$\Delta t = \frac{11 - 9}{\ln\left(\frac{11}{9}\right)} \cdot 0,906 = 9,042 \text{ (}^{\circ}\text{C)}.$$

Рівняння теплопередачі теплообмінника:

$$Q_{\text{м}} = k \cdot F \cdot \Delta t, \quad (2.26)$$

де $F=1120$ – сумарна площа теплообміну двох секцій АПО, м^2 .

З рівняння теплопередачі (2.26), визначаємо коефіцієнт теплопередачі АПО:

$$k = \frac{Q_{\text{м}}}{F \cdot \Delta t} = \frac{290 \cdot 10^3}{1120 \cdot 9,042} = 28,637.$$

Визначимо залежність витрати охолоджуваного повітря АПО оливи та частоту обертання вентиляторів, від температури повітря, враховуючи можливості теплообміну однієї секції АПО, за рахунок вільної конвекції. Розрахунки проведемо, використовуючи реальні робочі параметри. Діаметр трубок теплообмінника $d = 25$ мм. Температура оливи на вході в АПО становить $t'_{2м} = 84,6$ °С, на виході з АПО $t''_{2м} = 43,6$ °С, при температурі повітря на вході в АПО $t'_{2п} = 30$ °С. Витрата оливи при цьому $G_{2м}^м = 2$ кг/с.

Знаходимо тепловий потік, що потрібно передати від оливи до повітря:

$$Q_{2м} = G_{2м}^м \cdot C_p^м \cdot (t'_{2м} - t''_{2м}) = 2 \cdot 2035 \cdot (84,6 - 43,6) = 166,9 \text{ (кВт)}.$$

Максимально можлива витрата повітря однією секцією АПО:

$$G_c = \frac{G_{п} \cdot \rho_{п}}{2 \cdot 3600} = \frac{53360 \cdot 1,132}{2 \cdot 3600} = 8,4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right).$$

Тоді температура повітря на виході з секції АПО, за даних параметрів і визначеній витраті повітря однією секцією:

$$t''_{2п} = t'_{2п} + \frac{Q_{2м}}{G_c \cdot C_p^п} = 30 + \frac{166,9 \cdot 10^3}{8,4 \cdot 1237} = 46,076 \text{ (°С)}.$$

Можливість теплообміну однієї секції АПО, за рахунок вільної конвекції, визначимо при різних значеннях температури навколишнього повітря, в діапазоні температур від мінус 30 °С до +30 °С, з кроком в 10 °С.

Для розрахунку, прийємо середню температуру оливи в АПО:

$$t_m = \frac{1}{2} \cdot (t'_{2м} + t''_{2м}) = \frac{1}{2} \cdot (84,6 + 43,6) = 64,1 \text{ (°С)}.$$

Теплофізичні властивості повітря [16], в діапазоні температур від мінус 30 °С до +30 °С, для семи значень температур, наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Теплофізичні властивості повітря

Температура повітря $t_{\text{пн}}$, °С	Критерій Прандтля Pr_i	Теплопровідність λ_i Вт/м·К	Кінематична в'язкість $\nu_i \cdot 10^{-6}$, м ² /с
-30	0,723	0,0220	10,80
-20	0,716	0,0228	11,61
-10	0,712	0,0236	12,43
0	0,707	0,0244	13,28
10	0,705	0,0251	14,16
20	0,703	0,0259	15,06
30	0,701	0,0267	16,00

Температуру стінки приймемо, як середнє арифметичне температури повітря та оливи [14]:

$$t_{\text{ci}} = \frac{1}{2} \cdot (t_{\text{м}} + t_{\text{пн}}). \quad (2.27)$$

Визначимо значення критерію Грасгофа за формулою:

$$Gr_i = \frac{\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \Delta t'_i}{\nu^2}, \quad (2.28)$$

де $\beta = \frac{1}{303}$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;

$g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

$\Delta t'_i = t_c - t_{\text{ст}} - \text{температурний напір, } ^\circ\text{C}$.

Оскільки виконується умова $10^3 < Gr_i \cdot Pr_i < 10^8$, формула для визначення критерію Нуссельта має вигляд [13]:

$$Nu_i = \frac{1}{2} \cdot (Gr_i \cdot Pr_i)^{0.25}. \quad (2.29)$$

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі від трубки до повітря:

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \cdot \lambda_i}{d}. \quad (2.30)$$

Результати розрахунків коефіцієнта тепловіддачі за формулами (2.27) – (2.30) занесемо до табл.2.8.

Таблиця 2.8

Результати розрахунків коефіцієнта тепловіддачі

Температура повітря $t_{\text{ст}}$, $^\circ\text{C}$	Температура стінки $t_{\text{ст}}$, $^\circ\text{C}$	Критерій Грасгофа $Gr_i \cdot 10^4$	$Gr_i \cdot Pr_i \cdot 10^4$	Критерій Нуссельта Nu_i	Коефіцієнт тепловіддачі α_i , $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
-30	17,050	20,410	14,750	9,800	8,623
-20	22,050	15,780	11,300	9,167	8,360
-10	27,050	12,130	8,637	8,572	8,092
0	32,050	9,193	6,500	7,984	7,792
10	37,050	6,825	4,811	7,405	7,435
20	42,050	4,918	3,457	6,818	7,063
30	47,050	3,369	2,362	6,198	6,620

Тоді втрата теплоти з секції АПО, за умов вільної конвекції [14]:

$$Q_i = \alpha_i \cdot \frac{F}{2} \cdot \Delta t'_i. \quad (2.31)$$

У діапазоні температур визначимо залишок теплоти, що не зніметься вільною конвекцією, як різницю між тепловим потоком, що необхідно передати від оливи до повітря та втратами теплоти однієї секції АПО при вільній конвекції:

$$Q_{zi} = Q_{2m} - Q_i. \quad (2.32)$$

Результати обчислень за формулами (2.31), (2.32) заносимо в табл.2.9.

Таблиця 2.9

Можливість теплообміну однієї секції АПО за рахунок вільної конвекції

Температура повітря $t_{\text{ш}}, ^\circ\text{C}$	Втрати теплоти $Q_i \cdot 10^4, \text{Вт}$	Залишок теплоти $Q_{zi} \cdot 10^4, \text{Вт}$
-30	22,720	-6,034
-20	19,690	-3,000
-10	16,790	-0,102
0	13,980	2,702
10	11,260	5,425
20	8,722	7,965
30	6,321	10,370

У діапазоні температур навколишнього повітря, від мінус 30 $^\circ\text{C}$ до мінус 10 $^\circ\text{C}$, кількість тепла, що може зняти одна секція АПО, за рахунок вільної конвекції, більша ніж тепловий потік від оливи до повітря. Тому для визначення залежності витрати повітря вентилятором від температури

навколишнього середовища, діапазон температур від мінус 30 °С до мінус 10 °С не враховуємо.

Для зняття кількості теплоти Q_{zi} , що залишиться при вільній конвекції, за умов роботи однієї секції, є необхідним включення вентиляторів.

Розрахуємо масову витрату повітря, яка необхідна для зняття кількості теплоти Q_{zi} вентиляторам, виходячи з рівняння теплового балансу:

$$G_{vi} = \frac{Q_{zi}}{C_p^u \cdot \Delta t_n \cdot \rho_{pi}}, \quad (2.33)$$

де Δt_n – різниця між температурою повітря на виході з АПО та на вході в АПО;

ρ_{pi} – густина повітря в діапазоні температур, кг/м^3 .

Максимальна витрата повітря одним вентилятором:

$$G_v = \frac{G_c}{2} = \frac{8,4}{2} = 4,2 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$$

Розділимо максимальну витрату одного вентилятора на 4 ділянки і визначимо Δt_{mi} для отриманих витрат, за формулою:

$$\Delta t_{mi} = \frac{Q_{zi}}{G_{vi} \cdot C_p^u}. \quad (2.34)$$

Визначимо об'ємні витрати повітря вентилятором, потрібні для забезпечення охолодження оливи на величину Q_{zi} :

$$V_i = \frac{G_{vi}}{\rho_{pi}}. \quad (2.35)$$

Оскільки в запроєктованому АПО оливи впроваджено автоматичне регулювання продуктивності охолодження, шляхом плавної зміни частоти обертання робочих коліс вентиляторів.

Продуктивність вентилятора має прямо пропорційну залежність від частоти обертання, тому визначимо частоту обертання, враховуючи номінальне значення:

$$n_{vi} = \frac{V_i \cdot n_{II}}{G_{II}}, \quad (2.36)$$

де $n_{II} = 1600$ – номінальна частота обертання, хв^{-1} ;

$G_{II} = 3,706$ – номінальна продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$.

Результати розрахунків заносимо в табл.2.10.

Таблиця 2.10

Результати розрахунків залежності

Температура повітря $t_{in}, ^\circ\text{C}$	Залишок теплот и $Q_{zi} \cdot 10^4,$ Вт	Густина повітря $\rho_{pi},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Масова витрата $G_{vi}, \text{м}^3/\text{с}$	Об'ємна витрата $V_i, \text{м}^3$	Різниця температур $\Delta t_{pi}, ^\circ\text{C}$	Частота обертання $n_{vi}, \text{хв}^{-1}$
0	2,702	1,293	1,049	0,811	20,283	350
+10	5,425	1,247	2,098	1,682	20,903	726
+20	7,965	1,205	3,147	2,612	20,461	1128
+30	10,370	1,165	4,196	3,602	19,972	1555

Як видно з результатів розрахунків, при температурі $+30 ^\circ\text{C}$, частота обертання вентилятора наближається до номінального значення. Використання одного вентилятора забезпечує охолодження оливи, в діапазоні температур від

0 °C до +30 °C, з урахуванням можливості теплообміну, за рахунок вільної конвекції однієї секції АПО.

Зобразимо залежність частоти обертання ротора вентилятора, від температури навколишнього повітря, на рис. 2.4.

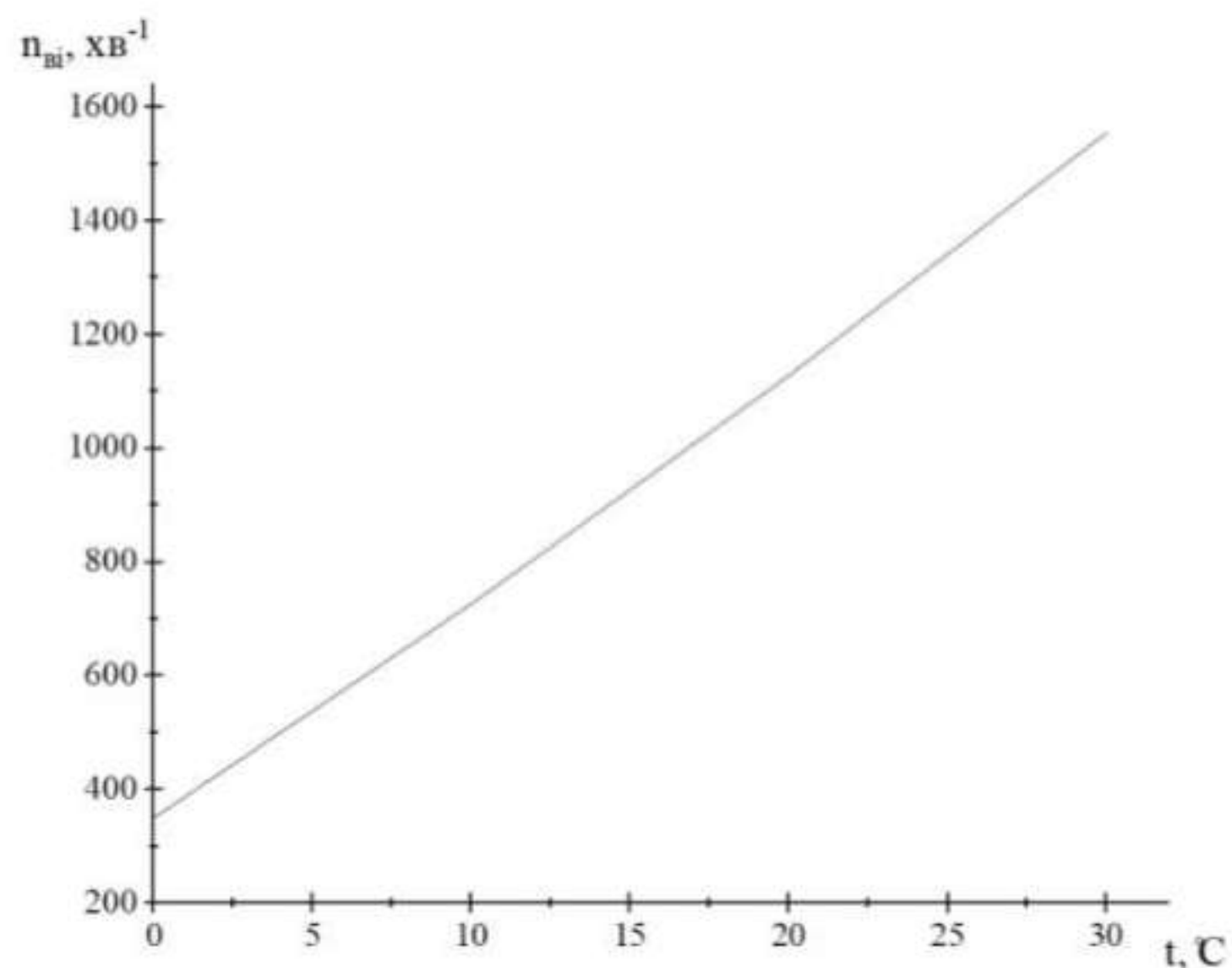


Рис. 2.4. Залежність частоти обертання ротора вентилятора АПО оливи від температури навколишнього повітря

Розробимо програму розрахунку, для визначення залежності частоти обертання ротора вентилятора АПО оливи, від температури навколишнього повітря, за спрощеною методикою, у програмному середовищі MathCAD (Додаток Г).

Висновки за розділом

У розділі 2 визначено фізико-хімічні властивості природного газу, відповідно компонентному складу газу, що транспортується КС-3.

Розглянуто процес стиснення природного газу у нагнітачі ЦН 235-21-1 і визначено показник політропи при робочих параметрах нагнітача, що експлуатується на КС-3.

Розроблено математичну модель розрахунку показника політропи процесу стиснення природного газу в нагнітачі та адаптовано для розрахунку погодинних значень показника політропи на протязі доби. Показано добову зміну значень політропної та адіабатичної робіт, процесу стиснення природного газу, що визначені з використанням еквівалентних площ у графічному методі зображення балансу роботи нагнітача.

Розраховано можливість теплообміну АПО за реальних робочих параметрів експлуатації, при номінальній витраті охолоджуваного повітря та за рахунок вільної конвекції. Визначено можливість теплообміну АПО, за рахунок природної конвекції, в прийнятому діапазоні температур навколишнього повітря. Визначено залежність обертів вентилятора АПО від температури навколишнього середовища, за прямо пропорційної залежності витрати повітря АПО від частоти обертання вентиляторів.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1. Вплив викидів забруднюючих речовин на навколишнє середовище

КС є складним технологічним об'єктом. На власні потреби КС витрачається значна кількість природного газу, в якості паливного газу для ГТД та підігрівачів паливного газу, що є основними вагомими джерелами викидів забруднюючих речовин КС. Із загальної кількості викидів природного газу на КС, майже 85% припадає на технологічні викиди під час запусків і зупинок ГПА, продування пиловловлювачів, до 10% пов'язано з різного роду витіканнями газу через свищі і нещільності запірно-регульованої арматури і до 5% втрат газу пов'язані з проведенням різного виду ремонтних робіт, ліквідацій аварійних ситуацій та ін.. Викиди газу мають в основному періодичний характер. Крім того температура вихлопних газів ГПА, знаходиться в межах 250-530 °С, що визначає високий залишковий тепловий потенціал і здійснює теплове забруднення навколишнього середовища. Характер викидів забруднювальних речовин залежить від метеоумов та від сезонних коливань об'єму газу, що транспортується.

Найбільшу частку забруднюючих речовин становлять продукти згоряння природного газу: оксид вуглецю CO, оксиди NO₂ та діоксиди азоту NO₂. Погіршується екологічна ситуація в районі розташування КС, ще й тим, що діоксиди вуглецю можуть перебувати в атмосфері від 5 до 10 років, оксиди азоту – від 2 до 4 років, оксид вуглецю – до півроку [17].

Діоксид азоту NO₂ – бурий газ з удушливим запахом, при температурі більше ніж 140 °С починає розкладатись на окис азоту та кисень. Вміст даної речовини в атмосфері знижує рівень сонячної радіації, а сполуки з озоном і

пероксиацетилнітратом утворюють фотохімічні оксиданти, що є причиною фотохімічного смогу. Природа цього явища полягає в тому, що при ультрафіолетовому опроміненні діоксиду азоту NO_2 в атмосфері протікають хімічні реакції з утворенням оксиду азоту NO_2 та озону O_3 . Надлишковий вміст у повітрі оксиду азоту може ініціювати процес розкладу озону.

При наявності в атмосфері вуглеводнів C_xH_y відбувається їх окислення з утворенням альдегідів, нітратів і т.д. Оксид азоту NO_x перетворюється на діоксид NO_2 , з'являється озон O_3 , а також пероксиацетилнітрат PAN. При з'єднанні O_3 , NO_2 та PAN утворюються фотохімічні оксиданти, які є однією з причин фотохімічного смогу. Кліматичний цикл випадання опадів має життєво важливе значення для всього людства. Великомасштабні впливи на процес випадання опадів можуть призвести до дуже серйозних наслідків. Проявом подібних впливів, що отримав досить широке поширення, є кислотні дощі. Діоксид азоту займає друге місце після двоокису сірки по внеску в збільшення кислотності опадів. На додаток до непрямого впливу (кислотний дощ), тривалий вплив діоксиду азоту в концентрації 470-1880 мкг/м^3 може придушувати ріст деяких рослин.

Оксид азоту NO – високотоксичний газ, без кольору, швидко окислюється в діоксид азоту. Оксид азоту спричиняє руйнування озонового шару, що призводить до зростання біологічно активної радіації. Швидкість окислення залежить від температури навколишнього середовища, атмосферного тиску. Шкідливим впливом на організм є те що NO_2 переводить гемоглобін в метабемоглобін та здійснює прямий вплив на центральну нервову систему.

Оксид вуглецю CO – газ без кольору і запаху, високотоксична сполука. Підвищення рівня CO в повітрі сприяє виникненню туманів, смогів, погіршує загальний стан атмосферного середовища. В присутності окису вуглецю в крові погіршується віддача кисню тканинам організму. Внаслідок токсикації настає слабкість, можливий головний біль, нудота тощо.

Враховуючи проведення модернізацій на КС, під час виконання зварювальних робіт, в повітряне середовище в незначній кількості виділяються

такі забруднюючі речовини, як оксид заліза, марганець, пил неорганічна, фториди газоподібні.

Шкідливий вплив на навколишнє середовище здійснює також шумове забруднення. Високий рівень шумового забруднення погіршує умови роботи персоналу та ускладнює вибір ділянки розташування КС, оскільки вплив поширюється і на прилеглі населені пункти також.

3.2. Розрахунок викидів забруднюючих речовин

Розрахуємо масу викидів шкідливих речовин, під час роботи двигуна ГТД-10В на номінальному режимі [18].

Середній наробіток одного ГПА КС-3 за рік, складає:

$$t = 2880 \text{ (год)}.$$

Визначаємо масову витрату палива ГТД на номінальному режимі:

$$G_{\Gamma} = \frac{V_0}{3600} \cdot \rho_0 = \frac{3406}{3600} \cdot 0,685 = 0,65 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$$

де $V_0 = 3406$ – об'ємна витрата палива, м³/год;

$\rho_0 = 0,685$ – густина газу в станційних умовах, кг/м³.

Витрата продуктів згоряння становить:

$$G_2 = G_3 + G_{\Gamma} = 72,5 + 0,65 = 73,15 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right),$$

де $G_3 = 72,5$ – витрата циклового повітря, кг/с.

Визначимо коефіцієнт надлишку повітря:

$$\alpha_B = \frac{G_3}{G_T \cdot L_0} = \frac{72,5}{0,65 \cdot 17,16} = 6,52,$$

де $L_0 = 17,16$ – кількість повітря необхідна для стехіометричного спалювання газу, кг/кг.

Густина продуктів згоряння в станційних умовах дорівнює:

$$\rho_{ПЗ} = 1,284 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right).$$

Розрахуємо витрату вологих продуктів згоряння:

$$G_{ПЗ} = \frac{G_2}{\rho_{ПЗ}} = \frac{73,15}{1,284} = 56,97 \left(\frac{\text{М}^3}{\text{С}} \right)$$

Визначимо коефіцієнт розбавлення сухих продуктів згоряння:

$$\alpha_{ПЗ} = \frac{\alpha_B - 0,105}{0,895} = \frac{6,52 - 0,105}{0,895} = 7,17.$$

Коефіцієнт співвідношення витрат сухих і вологих продуктів згоряння:

$$K_B = \frac{\alpha_B - 0,105}{\alpha_B + 0,105} = \frac{6,52 - 0,105}{6,52 + 0,105} = 0,97.$$

Визначимо концентрації CO та NO₂:

$$C_{\text{CO}} = \frac{C_{\text{CO}}^{15} \cdot 3,5}{\alpha_{\text{пз}}} = \frac{10 \cdot 3,5}{7,17} = 4,88 \left(\frac{\text{мг}}{\text{нм}^3} \right)$$

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{C_{\text{NO}_2}^{15} \cdot 3,5}{\alpha_{\text{пз}}} = \frac{135,5 \cdot 3,5}{7,17} = 66,18 \left(\frac{\text{мг}}{\text{нм}^3} \right)$$

де $C_{\text{CO}}^{15} = 10$ – приведена до 15% O₂ концентрація CO, мг/нм³;

$C_{\text{NO}_2}^{15} = 135,5$ – приведена до 15% O₂ концентрація NO₂, мг/нм³.

Тоді потужність викиду CO та NO₂:

$$M_{\text{CO}} = 10^{-3} \cdot C_{\text{CO}} \cdot K_{\text{в}} \cdot G_{\text{пз}} = 10^{-3} \cdot 4,88 \cdot 0,97 \cdot 56,97 = 0,27 \left(\frac{\text{г}}{\text{с}} \right)$$

$$M_{\text{NO}_2} = 10^{-3} \cdot C_{\text{NO}_2} \cdot K_{\text{в}} \cdot G_{\text{пз}} = 10^{-3} \cdot 66,18 \cdot 0,97 \cdot 56,97 = 3,65 \left(\frac{\text{г}}{\text{с}} \right)$$

Визначаємо викиди CO та NO₂ за рік за формулами:

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} \cdot 3600 \cdot M_{\text{CO}} \cdot t = 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 0,27 \cdot 2880 = 2,79 \left(\frac{\text{г}}{\text{рік}} \right)$$

$$E_{\text{NO}_2} = 10^{-6} \cdot 3600 \cdot M_{\text{NO}_x} \cdot t = 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 3,65 \cdot 2880 = 37,85 \left(\frac{\text{г}}{\text{рік}} \right)$$

Витрата паливного газу за рік:

$$B = 10^{-3} \cdot B_0 \cdot \rho_0 \cdot t = 10^{-3} \cdot 3406 \cdot 0,685 \cdot 2880 = 6719,36 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

Розрахуємо питомі викиди забруднюючих речовин CO та NO₂:

$$K_{\text{CO}} = \frac{10^6 \cdot E_{\text{CO}}}{B \cdot Q} = \frac{10^6 \cdot 2,79}{6719,36 \cdot 47,85} = 9 \left(\frac{\text{г}}{\text{ГДж}} \right)$$

$$K_{\text{NO}_2} = \frac{10^6 \cdot E_{\text{NO}_2}}{B \cdot Q} = \frac{10^6 \cdot 37,85}{6719,36 \cdot 47,85} = 118 \left(\frac{\text{г}}{\text{ГДж}} \right)$$

3.3. Економічна оцінка збитку від забруднення атмосфери

Економічна оцінка збитку від забруднення атмосфери проводимо за викидами оксиду вуглецю CO та оксиду азоту NO₂ визначеними в розрахунку викидів забруднюючих речовин.

Оцінка укрупненої величини загального економічного збитку, завданого об'єктам реципієнтам досліджуваної локальної території забрудненням атмосфери антропогенними викидами забруднюючих речовин (за умови відсутності точних даних про зони забруднення, розподіл структури ЗАЗ, концентрації домішок у повітрі й інших специфічних характеристик) виконується відповідно до рекомендацій [19]:

$$Y = K_i K_p \sum_{i=1}^n Y_i^\alpha,$$

де Y_i^α – збиток, завданий усім типам об'єктів-реципієнтів досліджуваної території техногенними викидами в атмосферу однієї тони i -го інгредієнта, грн/рік;

K_p – коефіцієнт обліку регіональних особливостей впливу забрудненої атмосфери на об'єкти-реципієнти (регіональний поправочний коефіцієнт);

K_i – коефіцієнт обліку фактора часу;

n – кількість домішок, що забруднюють повітряний простір досліджуваної території.

Величина поінгредієнтного локального економічного збитку, завданого реципієнтам забрудненням атмосфери окремо i -ю домішкою, обчислюється за формулою:

$$Y_i^\alpha = M_i^\alpha y_i^\alpha \sigma_i f_i,$$

де M_i^α - маса викиду в атмосферу i -го інгредієнта, т/рік;

σ_i – коефіцієнт, що враховує структуру факторів сприйняття в зоні активного забруднення i -м інгредієнтом (поправочний коефіцієнт факторів сприйняття);

y_i^α – питомий економічний збиток, якого завдає об'єктам-реципієнтам території викид в атмосферу однієї тонни i -го інгредієнта;

f_i – коефіцієнт, що враховує характер розсіювання i -ї домішки в атмосфері.

Згідно з рекомендаціями [19] приймаємо питомий економічний збиток y_i^α для викидів оксиду вуглецю та оксиду азоту рівним:

$$y_{CO}^\alpha = 90 \left(\frac{\text{грн}}{\text{т}} \right);$$

$$y_{NO_2}^\alpha = 280 \left(\frac{\text{грн}}{\text{т}} \right)$$

Коефіцієнт, що враховує характер розсіювання газоподібних викидів приймаємо рівним для висоти стаціонарного джерела викидів в атмосферу $h=20$ м і різниці температур вихлопних газів і навколишнього середовища $\Delta T=125^\circ\text{C} - f=2,2$.

Поправочний коефіцієнт факторів сприйняття σ_i відповідно до зони розташування КС-3 приймаємо, як для промзони $\sigma=0,8$.

Масу викиду в атмосферу оксиду вуглецю і оксиду азоту за рік була визначено раніше і рівна:

$$M_{\text{CO}}^{\alpha} = E_{\text{CO}} = 2,79 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

$$M_{\text{NO}_2}^{\alpha} = E_{\text{NO}_2} = 37,85 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

Визначимо величину поінгредієнтного локального збитку завдану від викиду оксиду вуглецю Y_{CO}^{α} і оксиду азоту $Y_{\text{NO}_2}^{\alpha}$:

$$Y_{\text{CO}}^{\alpha} = 2,79 \cdot 90 \cdot 0,8 \cdot 2,2 = 442 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

$$Y_{\text{NO}_2}^{\alpha} = 37,85 \cdot 280 \cdot 0,8 \cdot 2,2 = 18652,5 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

Обчислимо значення загального економічного збитку за рік роботи підігрівача двигуна ГТД-10В обравши значення регіонального коефіцієнта для Сумської області рівним $K_p=1,2$ і значення коефіцієнта обліку фактору часу $K_i=28,4$ відповідно до [19]:

$$Y = 28,4 \cdot 1,2 \cdot (442 + 18652,5) = 650741 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

3.4. Заходи щодо зменшення викидів забруднюючих речовин

Зменшення утворення викидів забруднюючих речовин можливо досягнути, за рахунок впливу на максимальну температуру горіння [20]. Здійснення впливу забезпечується введенням газів рециркуляції, води і пару в зону горіння. Також зменшення утворення забруднюючих речовин можна досягти реалізуванням багатоступінчатого спалювання палива, при якому знижується максимальна температура та вміст кисню в зоні максимальних температур. При триступінчатому спалюванні оксид азоту NO, що надійшов з окислювальної зони, відновлюється до молекулярного азоту.

Отже шляхи зменшення впливу забруднюючих речовин на навколишнє середовище:

- рециркуляція димових газів;
- впорскування води чи пару в зону горіння;
- впровадження багатоступінчатого спалювання палива;
- заміна застарілих ГТД на нові, з більшим значенням ККД;
- відмова від турбодетандерів на користь електростартерів;
- перехід на підігрівачі паливного газу типу «газ-газ».

Висновки за розділом

У розділі описано вплив викидів забруднюючих речовин, що є результатами діяльності КС, на навколишнє середовище. Розраховано кількість викидів забруднюючих речовин, для ГПА з двигуном ГТД-10В, що експлуатується на КС-3. Виконано економічну оцінку збитку від забруднення атмосфери викидами ГТД. Розглянуто шляхи зменшення викидів забруднюючих речовин на КС.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

Виробничий травматизм характеризується сукупністю виробничих травм, які мають місце на виробничому об'єкті на протязі певного періоду. Травма виникає внаслідок впливу на людину небезпечного і шкідливого виробничого фактору. При цьому порушується анатомічна цілісність людини або фізіологічних функцій організму.

Серед причин виникнення небезпечних і шкідливих виробничих факторів на КС найбільш імовірними є:

- порушення заходів безпеки, передбачених інструкціями;
- витоки газу;
- застосування під час ремонтних робіт інструменту, що може дати іскру;
- ремонтні роботи з використанням відкритого полум'я, без дотримання умов правил безпеки.

Небезпечні і шкідливі фактори, що можуть виникати в умовах роботи на КС відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [21] за природою дії поділяються на групи:

- фізичні;
- хімічні;

- біологічні;
- психофізіологічні.

Визначимо фактори, що відносяться до кожної групи, які виникають в робочих зонах КС.

Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що виникають в робочих зонах КС:

- підвищена концентрація шкідливих речовин в повітрі робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена рухомість повітря;
- нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена і знижена температури поверхонь обладнання та матеріалів;
- рухомі частини виробничого обладнання;
- стружка оброблюваних матеріалів, уламки інструментів;
- гострі кромки на поверхнях інструментів та обладнання;
- підвищена напруга в колі електричному та підвищений рівень статичної електрики.

Хімічні небезпечні і шкідливі фактори:

- за характером дії на організм людини – загально токсичні, подразнюючі;
- за шляхом проникнення в організм людини – через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкіряні покриви і слизові оболонки.

Психофізіологічні небезпечні і шкідливі фактори:

- фізичні перевантаження – статичні, динамічні;
- нервово-психічні перевантаження – розумові перевантаження, монотонність праці.

4.2. Вплив шкідливих факторів на людину і заходи щодо зменшення впливу цих факторів

Виробниче обладнання на КС в процесі роботи генерує механічні коливання різної частоти, які мають несприятливу дію на організм працюючих у вигляді шуму і вібрації [7].

Шум, як сукупність хвильових коливань часток у повітрі, що утворюють звуки, несприятливо діють на людину, заважають роботі і відпочинку. Величини шуму регламентуються згідно ДСН 3.3.6-037-99 [22]. Тривала дія шуму на слух людини може призвести до зниження чутливості органів слуху, часткової чи повної втрати слуху. Зменшення чутливості органів слуху, внаслідок тривалого впливу шуму, сприяє тимчасовому зміщенню межі чутливості, яке зникає після закінчення впливу шуму. При значно більшій тривалості та інтенсивності шумового впливу, можливі необоротні втрати слуху, що характеризуються постійною зміною межі чутливості. Подразнення шумом передається в центральну і вегетативну нервові системи, а через них діє на внутрішні органи, що може призвести до змін у функціональному стані організму. Також подразнення шумом може викликати почуття тривоги і роздратування. Чим вищий частотний склад шумів, чим вони інтенсивніші і триваліші, тим швидше і сильніше виявляють несприятливу дію на органи слуху. Засоби захисту органів слуху не дозволяють повністю усунути передачу звукової енергії, оскільки звукові коливання сприймаються не тільки органами слуху, а також через череп. Для зменшення впливу шуму на персонал, потрібно зменшувати час перебування людей біля безпосередніх джерел шуму та застосовувати індивідуальні засоби захисту від шуму. Також на КС присутня звукоізоляція трубопроводів, та управління здійснюється дистанційно з операторної, що зменшує вплив шуму на людину.

Вібрації – це механічні коливальні рухи, джерелами яких на КС є газопроводи, обладнання і деякі види інструментів [23]. Вібрація є професійною шкідливістю, якщо частини обладнання, що коливаються,

дотикаються до тіла працюючого. Розрізняють загальну та місцеву вібрації. Загальна пов'язана з переміщенням тіла у просторі. Місцева вібрація прикладається до обмеженої ділянки тіла, їй піддаються працюючі з електричним інструментом ударної та обертальної дії. Існують також комбіновані форми впливу. Вібрації викликають подразнюючі дії або перешкоди для трудового процесу. На ранніх стадіях впливу вібрацій виявляються функціональні зрушення у вигляді порушень вібраційної чутливості, подразнення вестибулярного аналізатору. Особливо небезпечними є коливання частотою від 4 Гц до 9 Гц, оскільки в таких межах є частота власних коливань органів людини. При частоті від 4 Гц до 100 Гц порушується діяльність внутрішніх органів і центральної нервової системи, знижується увага, робота спроможність, пам'ять, координація рухів, кров'яний тиск, проявляються нервові і психічні розлади. Якщо рівень вібрації вище 100 Гц – місцева вібрація затухає в організмі, виникають наведені хвороби, а також відбувається порушення рухомості м'язів, суглобів і відбуваються спазми серця. Для зменшення шкідливого впливу вібрації, потрібно зменшувати контакт людини з джерелами вібрації, а також зменшувати рівень вібрацій, за допомогою встановлення двигунів на ресори, які мають кращу поглинаючу здатність, використання віброізолюючих матеріалів.

Більшість робіт на КС виконуються під зоровим контролем – спостереження за роботою механізмів, апаратів, контрольно-вимірювальних приладів і при виконанні виробничих операцій. При цьому, органи зору людини зазнають навантаження певної міри і виникає напруження, що за певних умов приведе до стомлення органів зору та загального стомлення організму. Недостатня освітленість діє на ступінь стомленості очей, яка залежить від ступеня напруженості процесів, що супроводжують зорове сприйняття предметів навколишнього світу. Від рівня освітленості залежить гострота зору і сталого бачення. Світлові подразники певних ділянок сонячного спектру викликають різні психологічні реакції. Помаранчево-червона частина спектру справляє збудливу дію і підсилює відчуття тепла, жовто-зелена частина –

заспокійливий вплив, в той час як синьо-фіолетові холодні тони мають пригнічувальну, гальмівну дію на організм людини. Тому ця властивість використовується при оформленні цехів. Штучне освітлення повинно створювати достатню освітленість на робочих місцях, оскільки недостатня освітленість робочої зони може призвести до погіршення якості робіт, виконуваних працівниками, а також до погіршення зору, в деяких випадках умови недостатнього освітлення можуть призвести до травмування. Правильне освітлення на робочому місці не повинно створювати засліплюючу дію.

4.3. Розрахунок контура заземлення АПО

Заземлення АПО оливи виконується контуром заземлення, опір заземлення якого повинен складати не більше 4 Ом [24]. Заземлюючий контур складається з поверхневих заземлювачів та вертикальних електродів.

Виконаємо розрахунок контуру заземлення.

Відстань від поверхні землі до середини вертикальних електродів:

$$t_b = h + \frac{L_b}{2} = 0,7 + \frac{4,5}{2} = 2,95 \text{ (м)},$$

де h – глибина закладання електродів, м;

$L_b = 4,5$ – довжина вертикальних електродів, м;

Опір розтікання струму від одиночного вертикального стержневого заземлення:

$$\begin{aligned} R_{зв} &= \frac{0,366 \cdot \rho}{L_b} \cdot \left(\lg\left(\frac{2 \cdot L_b}{d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot t_b + L_b}{4 \cdot t_b - L_b}\right) \right) = \\ &= \frac{0,366 \cdot 100}{4,5} \cdot \left(\lg\left(\frac{2 \cdot 4,5}{0,016}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot 2,95 + 4,5}{4 \cdot 2,95 - 4,5}\right) \right) = 23,8 \text{ (Ом)}, \end{aligned}$$

де $d = 0,016$ – зовнішній діаметр електрода, м;

$\rho = 100$ – питомий опір ґрунту (суглинок), Ом·м.

Опір розтіканню струму горизонтального електрода:

$$R_{зг} = \frac{0,366 \cdot \rho}{L_r} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot L_r^2}{b \cdot t}\right) = \frac{0,366 \cdot 100}{30} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 30^2}{0,4 \cdot 0,7}\right) = 4,65 \text{ (Ом)},$$

де $L_r = 30$ – довжина з'єднувального електрода, м;

$b = 0,4$ – ширина електрода, м;

$t = 0,7$ – глибина закладання електроду, м.

Визначимо уточнені значення опорів, врахувавши екранування електродів сусідніми. Для вертикальних електродів, при відстані між електродами, рівній довжині електродів, та кількості електродів $n = 4$, коефіцієнт екранування електродів сусідніми $\eta_v = 0,72$.

Тоді уточнене значення опору розтікання вертикальних електродів:

$$R'_{зв} = \frac{R_{зв}}{n \cdot \eta_v} = \frac{23,8}{4 \cdot 0,72} = 8,26 \text{ (Ом)}.$$

Для горизонтальних електродів, враховуючи кількість вертикальних, обираємо $\eta_r = 0,77$.

Розрахуємо уточнене значення опору горизонтального електроду

$$R'_{зг} = \frac{R_{зг}}{\eta_r} = \frac{4,65}{0,77} = 6,04 \text{ (Ом)}.$$

Визначимо результуючий опір контуру заземлення:

$$R_з = \frac{R_{зв}^{екв} \cdot R_{зг}^{екв}}{R_{зв}^{екв} + R_{зг}^{екв}} = \frac{8,26 \cdot 6,04}{8,26 + 6,04} = 3,49 \text{ (Ом)}.$$

4.4. Пожежо– і вибухобезпека на КС

КС є найбільш небезпечними серед об'єктів підвищеної пожежо- та вибухонебезпеки, що входять до інфраструктури підприємств транспорту газу. Пожежі на таких об'єктах характеризуються швидкоплинним характером та значними збитками [25]. Система автоматичного пожежогасіння та система автоматичного газовиявлення, забезпечують пожежну та вибухобезпеку.

Система автоматичного газовиявлення забезпечує:

- виявлення загазованості в КЦ та блочних укриттях ГПА;

- подачу звукового та світлового сигналу на диспетчерський пульт;
- автоматичний пуск аварійної витяжної вентиляції при досягненні концентрації газоповітряної суміші 10% від нижньої концентрації границі вибуховості;
- аварійну зупинку КЦ або ГПА в окремому укритті, якщо концентрація газоповітряної суміші перевищує 20% від нижньої концентрації границі вибуховості.

Автоматична система пожежогасіння – це система, яка виконує функції виявлення ознак горіння, оповіщення про пожежу та подавання вогнегасної речовини без втручання людини.

Система автоматичного пожежогасіння повинна забезпечувати:

- виявлення ознак пожежі в КЦ чи блочних укриттях ГПА;
- видачу команди (сигналів) для аварійної зупинки ГПА (КЦ) з відключенням від газопроводу і випусканням газу з технологічних комунікацій КС;
- видачу команди (сигналів) для відключення електротехнічного обладнання, аварійної витяжної вентиляції, системи кондиціонування;
- автоматичний та ручний пуск системи автоматичного пожежогасіння (подачу вогнегасної речовини до місця пожежі);
- подачу звукового та світлового сигналів про спрацювання системи автоматичного пожежогасіння на диспетчерський пункт;
- автоматичне переключення ланцюгів живлення пунктів керування і сигналізації з робочого вводу електропостачання на резервний у разі зникнення напруги на робочому вводі, а також зворотне переключення при відновленні на ньому напруги.

Автоматичні системи пожежогасіння захищають окремі відсіки ГПА:

- відсік нагнітача;
- відсік двигуна;
- відсік оливи агрегатів.

При роботі системи автоматичного пожежогасіння у режимі «авт. пуск ввімкнено», вона спрацьовує при надходженні сигналів про пожежу від двох пожежних датчиків у систему, яка в свою чергу видає наступні сигнали та імпульси:

- сигнал в систему керування ГПА для аварійної зупинки працюючого ГТД і відключення систем вентиляції;
- імпульс на ввімкнення приладів світлового оповіщення по відсіку, що захищається, та звуковий – по всьому ГПА;
- імпульси на пуск батарей газowego пожежогасіння.

В системах протипожежного захисту ГПА застосовано комбіновані автоматичні установки газowego пожежогасіння з використанням в них CO₂ високого тиску для захисту замкненого простору під кожухом, та галону 1301 або хладону 2402 для захисту всього об'єму укриття ГПА.

Серед вогнегасників, якими забезпечено КС, переважну більшість складають переносні та пересувні порошкові вогнегасники, споряджені вогнегасними ВС-порошками. У пожежних автомобілях, якими захищаються КС, найбільш поширено застосовують біологічно «жорсткі» піноутворювачі загального призначення «ПО-6К» та ПО-1.

4.5. Інструкція з техніки безпеки оператора МГ

Робочим місцем оператора МГ є головний щит керування, де розташована диспетчерська служба лінійного виробничого управління магістрального газопроводу (ЛВУМГ) з керування системами, обладнанням компресорної станції, газорозподільчими станціями та лінійною частиною магістрального газопроводу з усіма переліченими вище спорудами, обладнанням, охоронною зоною, майданчиками із запасом труб і матеріалів [26].

Робота оператора МГ полягає у здійсненні контролю за надійною та економічною роботою газопроводів, компресорних станцій (КС),

газорозподільних станцій (ГРС) у межах ЛВУМГ; веденні добових відомостей, в яких позначається тиск і температура на вході та виході КС, кількість газоперекачувальних агрегатів, які знаходяться у резерві та ремонті; тиск газу на вході та виході ГРС, відомості з обходу траси газопроводів лінійними обхідниками, тиск газу на трасі газопроводу, відомості про роботу установок електрохімзахисту; з'ясуванні причин і термінів змін режимів роботи газопроводів, КС і ГРС.

Оператор МГ повинен знати вимоги з охорони праці, передбачені даною інструкцією, інструкціями за видами робіт та інструкціями заводів-виготовлювачів з експлуатації обладнання, що використовується у роботі; властивості шкідливих та отруйних речовин; правила поводження з метанолом, одорантом та конденсатом; план локалізації та ліквідації можливих аварійних ситуацій і аварій на лінійній частині трубопроводу та порядок збору аварійної бригади; схему виклику лінійних обхідників, операторів ГРС та працівників виробничих служб, які виїхали для виконання робіт на лінійну частину МГ; правила внутрішнього трудового розпорядку.

Оператор МГ повинен пам'ятати, що дотримання вимог інструкцій є основною вимогою запобігання нещасним випадкам. Порухення оператором МГ вимог інструкцій розглядається, як порушення ним трудової дисципліни, за яке до нього може бути застосовано стягнення згідно з чинним законодавством.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

– оператор МГ приступає до роботи на головному щиті диспетчерської служби і повинен прийняти від попереднього оператора всю оперативну документацію, яку необхідно буде заповнювати у процесі виконання службових обов'язків;

– оператор МГ повинен відмітити у змінному журналі дату та час, коли він прийняв зміну, і оперативні дані про ситуацію на трасі газопроводу. При аварійних ситуаціях рішення про прийняття та здавання зміни приймає старший диспетчер зміни;

– оператор МГ повинен перевірити наявність на робочому місці: технологічних схем з нанесенням комунікацій, арматури і запірних пристроїв усіх виробничих об'єктів, які входять до сфери обслуговування оператора МГ (лінійна частина, усі ГРС, технологічні насосні, котельні тощо);

– оператор МГ повинен ознайомитись зі станом і режимами роботи МГ, КС, ГРС. За необхідності з'ясувати причини і строки зміни режиму роботи об'єктів.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

– обхід і огляд обладнання, споруд та виробничих приміщень здійснюється згідно з картою обходу. Під час обходу перевіряється правильність режиму роботи, справність і цілісність обладнання, будівель споруд;

– огляд колодязів з обладнанням чи запірною арматурою на трасі трубопроводу оператор МГ проводить у складі бригади за нарядом-допуском на газонебезпечні роботи. Перед опусканням в колодязь проводиться аналіз повітряного середовища в ньому. Опускатись в колодязь одному без захисту органів дихання, страхування та нагляду забороняється. Люки колодязів відкривати і закривати необхідно плавно, без ударів, які можуть утворити іскру. Аварійний вибухобезпечний ліхтар необхідно включати і виключати за межами колодязя;

– при виникненні нещасного випадку чи раптового захворювання, виявленні фактів порушення технологічного процесу, несправності трубопроводу, обладнання, пристроїв, інструменту, засобів захисту та про інші небезпечні та шкідливі фактори, що загрожують життю і здоров'ю людей, оператор МГ зобов'язаний повідомити диспетчера і керівництво лінійно-експлуатаційної служби.

Вимоги безпеки після закінчення роботи:

– після закінчення зміни оператор МГ повинен перевірити записи у оперативному журналі, зробити відмітку про передачу зміни;

– про всі виконані роботи і виявлені недоліки, а також про стан ділянки трубопроводу з усіма розміщеними на цій ділянці спорудами і обладнанням; про стан закріпленої техніки, механізмів та інструментів, про наявність чи потребу необхідних матеріалів і обладнання для обслуговування і виконання профілактичних ремонтних робіт оператор МГ доповідає диспетчеру і робить відповідні записи у оперативному журналі.

Висновки за розділом

У розділі визначено небезпечні і шкідливі фактори, які можуть виникати в умовах роботи на КС. Описано шкідливий вплив цих факторів на організм людини та заходи боротьби зі шкідливим впливом на організм людини. Виконано розрахунок контура заземлення АПО оливи на КС-3. Описано систему пожежогасіння ГПА, що забезпечує пожежо- і вибухобезпеку на КС. Описано інструкції з охорони праці оператора МГ.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено шляхи модернізації ГПА на базі КС-3 Ромненської ГКС.

Приведено короткий опис компресорного цеху КС-3 і газопроводу «Слець – Кременчук – Кривий Ріг», що ним обслуговується. Наведено основні технічні дані КС. Описано конструкцію складових ГПА – двигун ГТД-10В, нагнітач типу ЦН-235-21-1 та їх основні технічні дані.

Розглянуто можливі шляхи модернізації ГПА на базі КС-3 та описано їх роль в енергозбереженні станції.

Проаналізовано виконання етапів модернізації ГПА №5 КС-3, що проводилась неодноразово та доцільність виконання основних технологічних рішень.

Наведено переваги двигуна ДН-70 у порівнянні з ДР59Л, за основними технічними показниками та результати дослідно-промислової експлуатації ГПА-10-МН70 з приводом від ДН-70, яким було замінено ГПА-10-01 під час першої модернізації ГПА №5 КС-3 у 2005 році. Проаналізовано результати експлуатації ГПА-10-МН70 в межах п'яти років і визначено незадовільну надійність двигуна ДН-70 у складі ГПА.

Описано заходи виконані при повторній модернізації ГПА №5 КС-3 з заміною ГПА-10-МН70 на блок ГПА-10-01Е з ГТД-10В. Заміна блоку двигуна була проведена у зв'язку з низькими показниками надійності ДН-70, значної кількості відмов, зокрема середня кількість пусків ДН-70 у рік втричі перевищує дане значення по ДР-59Л. ГТД-10В являє собою модернізований ДР-59Л з удосконаленою проточною частиною та збереженими габаритними

розмірами і кріпленнями, що дозволяє пришвидшити і здешевити процес модернізації. Приведено комплекс основних технологічних рішень реконструкції елементів зовнішніх підключень, систем та елементів ГПА, передбачених проектом модернізації ГПА-10-МН70 на КС-3. Проведено порівняльний аналіз основних технічних даних двигуна ДН-70 і ГТД-10В.

Розглянуто метод модернізації ГПА шляхом заміни АПО оливи та проаналізовано його відповідність сучасним вимогам з енергозбереження. Приведено основні технологічні рішення проекту капітального ремонту систем охолодження оливи на ГПА-10-01 №5 КС-3 Ромненської ГКС. Описано конструкцію запроєктованих АПО оливи АПОО210.8.6,5к-ПМ2 та їх переваги у використанні, щодо існуючих апаратів АПО типу 06-10. Проаналізовано технічні характеристики запроєктованого АПО оливи у порівнянні з існуючими АПО, типу 06-10, та ефективність використання нових апаратів, з точки зору відповідності вимогам енергозбереження.

Визначено фізико-хімічні властивості природного газу, відповідно компонентному складу газу, що транспортується КС-3.

Розглянуто процес стиснення природного газу у нагнітачі типу ЦН-235-21-1 і визначено показник політропи, при робочих параметрах нагнітача, що експлуатується на КС-3. При визначенні показника політропи використано метод графічного зображення балансу роботи нагнітача, при якому значення робіт визначаються, як величини відповідних еквівалентних площ на діаграмі балансу роботи у T-S координатах.

Розроблено математичну модель, розрахунку показника політропи процесу стиснення природного газу в нагнітачі та адаптовано для розрахунку погодинних значень показника політропи на протязі доби. Показано добову зміну значень політропної та адіабатичної робіт, процесу стиснення природного газу, що визначені з використанням графічного методу.

Визначено коефіцієнт теплопередачі за паспортних даних теплообмінника та кількість теплоти, що задіяна у теплообміні за реальних

робочих параметрів. Розраховано можливість теплообміну АПО, при реальних робочих параметрах експлуатації, за номінальної витрати охолоджуваного повітря та за умов вільної конвекції, при вимкнених вентиляторах. Визначено можливість теплообміну АПО, за рахунок природньої конвекції, в прийнятому діапазоні температур навколишнього повітря. Приведено залежність частоти обертання вентиляторів АПО від температури навколишнього повітря, з урахуванням можливості природньої конвекції.

Виходячи з вище наведеного, показано що:

- використання запроєктованих АПО оливи, дозволяє зменшити витрати електроенергії, завдяки впровадженому частотному регулюванню обертання вентиляторів, до 40% в рік;
- рекомендовано впроваджувати АПО оливи з частотним регулюванням обертання вентиляторів на інші компресорні станції з метою значної економії електроенергії.

Розглянуто вплив викидів забруднюючих речовин, що є результатами діяльності КС, на навколишнє середовище. Розраховано кількість викидів забруднюючих речовин ГПА з двигуном ГТД-10В, що експлуатується на КС-3 та виконано економічну оцінку збитку від забруднення атмосфери викидами ГТД. Розглянуто шляхи зменшення викидів забруднюючих речовин на КС.

Описано небезпечні і шкідливі фактори, які можуть виникати в умовах роботи на КС. Розглянуто негативний вплив небезпечних і шкідливих факторів на організм людини та заходи щодо зменшення впливу на організм людини. Описано автоматичну систему пожежогасіння ГПА, що забезпечує пожежо- і вибухобезпеку на КС. Виконано розрахунок контура заземлення запроєктованого АПО оливи. Приведено інструкції з охорони праці оператора МГ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Характеристика газопроводу «Єлець – Кременчук – Кривий Ріг» [Електронний ресурс] : за даними ПАТ «Укртрансгаз» ; ред. І. К. Кравчишин. – 2007. – Режим доступу: <http://utg.ua/utg/gts/description.html>.
2. «Модернізація агрегату ГПА-10МН70 ст.№5 на КС Ромненська-3 Сумського ЛВУ МГ» (Робочий проект) [Текст]. ТОВ «ЦЕНТРГАЗПРОЕКТ ТВП», 2011 – 42с.
3. Мельник М. С. Метод регулювання подачі паливного газу в камеру згорання газотурбінної установки потужністю 10 МВт.: дипл. Роб. На здобуття освітнього ступеня бакалавр: спец. 142 «Енергетичне машинобудування»/Мельник Михайло Сергійович;Національний авіаційний ун-т. – Київ, 2018. – 76 с.
4. Двигун газотурбінний ГТД-10В (технічні умови ТУ У 29.1-13461621-006:2009) [Текст]. «Констар», 2009. – 43с.
5. Техническое описание и инструкция по монтажу, эксплуатации и уходу за группой маслоохладителей зимного исполнения типа 06-10 [Текст]. – Будапешт: Институт Энергетики Главный отдел воздушной конденсации, 1979. – 42с.
6. Капітальний ремонт системи охолодження масла на ГПА-10-01 ст.№5 компресорної станції Ромненська-3 Сумського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів (Робочий проект 16006000736-ПЗ) [Текст]. ТОВ «ЦЕНТРГАЗПРОЕКТ ТВП», 2016. – 136с.
7. Двигатель ДР59Л (Техническое описание 029108200 ТО) [Текст]: – Николаев : Издательство «Машпроект», 1972. – 43с.

8. Нагнетатели центробежного типа 235-21-1, 235-22-1, 235-24-1 (Техническое описание 2349-ОЗТО) [Текст]. – «Невский завод», 1983. – 29с.
9. М.П. Андріішин Компресорні станції магістральних газопроводів [Текст]: метод. Рекомендації до виконання курсового проекту для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»/ М. П. Андріішин, К. І. Капітанчук, В. В. Козлов; – К. : НАУ, 2018. – 60 с.
10. Трубопровідний транспорт газу: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Сусак О. М., Касперович В. К., Андріішин М. П. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – 345 с.
11. Справочник химика, т. I. Госхим-издат. М. – Л., 1968 стр. 342–370.
12. Стечкин Б.С., Казаджан П.К., Алексеев Л.П., Гворов А.Н., Нечаев Ю.Н. Теория реактивных двигателей. – Оборонгиз, 1956.
13. Апарат повітряного охолодження оливи АПОО 210.8.6,5к-ПМ2 (Паспорт ХАА147.00.000ПС) [Текст]. – Борислав: Видавництво ТДВ «Бориславський завод «РЕМА», 2019. – 9с.
14. МИХЕЕВ М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - М. : Энергия, 1973. – 320с.
15. Нікітіна Г.М. Тепломасообмін [Текст]: метод. рекомендації до виконання курсової роботи «Тепловий і гідравлічний розрахунок рекуперативного теплообмінного апарату» для студентів напряму 6.050604“Енергомашинобудування”/Г.М. Нікітіна; Нац. авіа. ун-т. – К.: НАУ, 2012. – 34 с.
16. Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Електронний ресурс]. Режим доступа:<http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya>
17. Книга 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-1/97-entsiklopediya/elektroenergetika-ta-okhorona-navkolishnogo-seredovishcha-funktsionuvannya-energetiki-u-suchasnomu-sviti>

18. Каталог техніко-екологічних показників газоперекачувальних агрегатів підприємств АТ «Укргазпром»/ АТ «Укргазпром», 1996
19. Економіка природокористування. Методичні вказівки для виконання практичних занять / Мартиненко А. П., Мартиненко В. Г., 2017
20. Методи зниження викидів токсичних речовин в атмосферу [Електронний ресурс]. Режим доступу:<http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-2/2-3>
21. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ. 01.01.76.
22. ДСН 3.3.6-037-99. Санитарные нормы производственного шума, ультразвука и инфразвука.
23. ДСТУ 2300-93. Вібрація. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.95
24. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования под ред. Барыбина Ю.Г., Круповича В.И., Самовера М.Л. Изд.3-е перераб. и доп. М., “Энергоиздат”, 1981 г
25. Деревинський Д. М. Обґрунтування умов застосування вогнегасних речовин в системах протипожежного захисту газокомпресорних станцій: автореф. дис. На здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : спец. 21.06.02 «Пожежна безпека»/Деревинський Денис Миколайович; Київ. Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки. – Київ, 2005. – 27.
26. ПІ 1.1.23-207-2002. Примірні інструкції з охорони праці для оператора магістральних газопроводів.

Додаток А

Програма розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу

$$\text{CH}_4 := 95.2834$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 := 2.692$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 := 0.838$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} := 0.253$$

$$\text{C}_5\text{H}_{12} := 0.041$$

$$\text{C}_6\text{H}_{14} := 0.0152$$

$$\text{O}_2 := 0.0034$$

$$T_n := 273$$

$$T_{st} := 293$$

$$\rho_{пов} := 1.2047$$

$$P_{st} := 101325$$

$$P_{vs} := 5.348 \cdot 10^6$$

$$P_n := 6.835 \cdot 10^6$$

$$t_{vs} := 22.2$$

$$t_n := 44.5$$

$$c_p := 4187 \frac{\text{CH}_4 0.51725 + \text{C}_2\text{H}_6 0.3934 + \text{C}_3\text{H}_8 0.3701 + \text{C}_4\text{H}_{10} 0.3802 + \text{C}_5\text{H}_{12} 0.3805 + \text{C}_6\text{H}_{14} 0.3827 + \text{O}_2 0.2185 + \text{N}_2 0.2482 + \text{CO}_2 0.1946}{100} = 2.134 \times 10^3$$

$$c_v := 4187 \frac{\text{CH}_4 0.3936 + \text{C}_2\text{H}_6 0.3273 + \text{C}_3\text{H}_8 0.3252 + \text{C}_4\text{H}_{10} 0.3466 + \text{C}_5\text{H}_{12} 0.3533 + \text{C}_6\text{H}_{14} 0.36 + \text{O}_2 0.1496 + \text{N}_2 0.1770 + \text{CO}_2 0.1496}{100} = 1.629 \times 10^3$$

$$k := \frac{c_p}{c_v} = 1.31$$

$$R_w := \frac{(52.95\text{CH}_4 + 28.19\text{C}_2\text{H}_6 + 19.23\text{C}_3\text{H}_8 + 14.95\text{C}_4\text{H}_{10} + 11.75\text{C}_5\text{H}_{12} + 9.84\text{C}_6\text{H}_{14} + 26.47\text{O}_2 + 30.26\text{N}_2 + 19.27\text{CO}_2)}{100} \cdot 9.81 = 506.749$$

$$\rho_i := \frac{\text{CH}_4 16 + \text{C}_2\text{H}_6 30 + \text{C}_3\text{H}_8 44 + \text{C}_4\text{H}_{10} 58 + \text{C}_5\text{H}_{12} 72 + \text{C}_6\text{H}_{14} 86 + \text{O}_2 32 + \text{N}_2 28 + \text{CO}_2 44}{22.4 \cdot 100} = 0.754$$

$$\rho_{st} := \rho_i \cdot \frac{T_n}{T_{st}} = 0.703$$

$$\Delta := \frac{\rho_{st}}{\rho_{пов}} = 0.583$$

Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 235-21-1

i := 0.. 25

$T_{i+1} :=$

0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
22.2
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
44.5
46

$T_2 := T + 273 =$

	0
0	273
1	275
2	277
3	279
4	281
5	283
6	285
7	287
8	289
9	291
10	293
11	295
12	295.2
13	297
14	299
15	301
16	303
17	305
18	307
19	309
20	311
21	313
22	315
23	317
24	317.5
25	319

$$S1 := cv \cdot \ln \left(\frac{T_2^k}{P_{vs}^{k-1}} \right) =$$

	0
0	4.148·10 ³
1	4.163·10 ³
2	4.179·10 ³
3	4.194·10 ³
4	4.209·10 ³
5	4.225·10 ³
6	4.24·10 ³
7	4.254·10 ³
8	4.269·10 ³
9	4.284·10 ³
10	4.299·10 ³
11	4.313·10 ³
12	4.315·10 ³
13	4.328·10 ³
14	4.342·10 ³
15	4.356·10 ³
16	4.37·10 ³
17	4.384·10 ³
18	4.398·10 ³
19	4.412·10 ³
20	4.426·10 ³
21	4.44·10 ³
22	4.453·10 ³
23	4.467·10 ³
24	4.47·10 ³
25	4.48·10 ³

$$S2 := cv \cdot \ln \left(\frac{T_2^k}{P_n^{k-1}} \right) =$$

	0
0	4.024·10 ³
1	4.039·10 ³
2	4.055·10 ³
3	4.07·10 ³
4	4.085·10 ³
5	4.101·10 ³
6	4.116·10 ³
7	4.131·10 ³
8	4.145·10 ³
9	4.16·10 ³
10	4.175·10 ³
11	4.189·10 ³
12	4.191·10 ³
13	4.204·10 ³
14	4.218·10 ³
15	4.232·10 ³
16	4.246·10 ³
17	4.26·10 ³
18	4.274·10 ³
19	4.288·10 ³
20	4.302·10 ³
21	4.316·10 ³
22	4.329·10 ³
23	4.343·10 ³
24	4.346·10 ³
25	4.356·10 ³

$T_3 := 295.2 \quad S_3 := 4000.. 4600 \quad i_4 := 0.. 23$

$$P_0 := P_{vs} = 5.348 \times 10^6 \quad i_5 := 1.. 23 \quad P_{i_5} := P_{i_5-1} + \frac{(P_n - P_{vs})}{23}$$

$T4_{i4} :=$

295.2
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
317.5

$Pser_{i4} :=$

$5.348 \cdot 10^6$
$5.413 \cdot 10^6$
$5.477 \cdot 10^6$
$5.542 \cdot 10^6$
$5.607 \cdot 10^6$
$5.671 \cdot 10^6$
$5.736 \cdot 10^6$
$5.801 \cdot 10^6$
$5.865 \cdot 10^6$
$5.93 \cdot 10^6$
$5.995 \cdot 10^6$
$6.059 \cdot 10^6$
$6.124 \cdot 10^6$
$6.188 \cdot 10^6$
$6.253 \cdot 10^6$
$6.318 \cdot 10^6$
$6.382 \cdot 10^6$
$6.447 \cdot 10^6$
$6.512 \cdot 10^6$
$6.576 \cdot 10^6$
$6.641 \cdot 10^6$
$6.706 \cdot 10^6$
$6.77 \cdot 10^6$
$6.835 \cdot 10^6$

	0
0	295.2
1	296
2	297
3	298
4	299
5	300
6	301
7	302
8	303
9	304
10	305
11	306
12	307
13	308
14	309
15	310
16	311
17	312
18	313
19	314
20	315
21	316
22	317
23	317.5

	0
0	$5.348 \cdot 10^6$
1	$5.413 \cdot 10^6$
2	$5.477 \cdot 10^6$
3	$5.542 \cdot 10^6$
4	$5.607 \cdot 10^6$
5	$5.671 \cdot 10^6$
6	$5.736 \cdot 10^6$
7	$5.801 \cdot 10^6$
8	$5.865 \cdot 10^6$
9	$5.93 \cdot 10^6$
10	$5.995 \cdot 10^6$
11	$6.059 \cdot 10^6$
12	$6.124 \cdot 10^6$
13	$6.188 \cdot 10^6$
14	$6.253 \cdot 10^6$
15	$6.318 \cdot 10^6$
16	$6.382 \cdot 10^6$
17	$6.447 \cdot 10^6$
18	$6.512 \cdot 10^6$
19	$6.576 \cdot 10^6$
20	$6.641 \cdot 10^6$
21	$6.706 \cdot 10^6$
22	$6.77 \cdot 10^6$
23	$6.835 \cdot 10^6$

	0
0	$4.315 \cdot 10^3$
1	$4.314 \cdot 10^3$
2	$4.316 \cdot 10^3$
3	$4.317 \cdot 10^3$
4	$4.318 \cdot 10^3$
5	$4.319 \cdot 10^3$
6	$4.321 \cdot 10^3$
7	$4.322 \cdot 10^3$
8	$4.324 \cdot 10^3$
9	$4.325 \cdot 10^3$
10	$4.327 \cdot 10^3$
11	$4.328 \cdot 10^3$
12	$4.33 \cdot 10^3$
13	$4.332 \cdot 10^3$
14	$4.333 \cdot 10^3$
15	$4.335 \cdot 10^3$
16	$4.337 \cdot 10^3$
17	$4.338 \cdot 10^3$
18	$4.34 \cdot 10^3$
19	$4.342 \cdot 10^3$
20	$4.344 \cdot 10^3$
21	$4.346 \cdot 10^3$
22	$4.348 \cdot 10^3$
23	$4.346 \cdot 10^3$

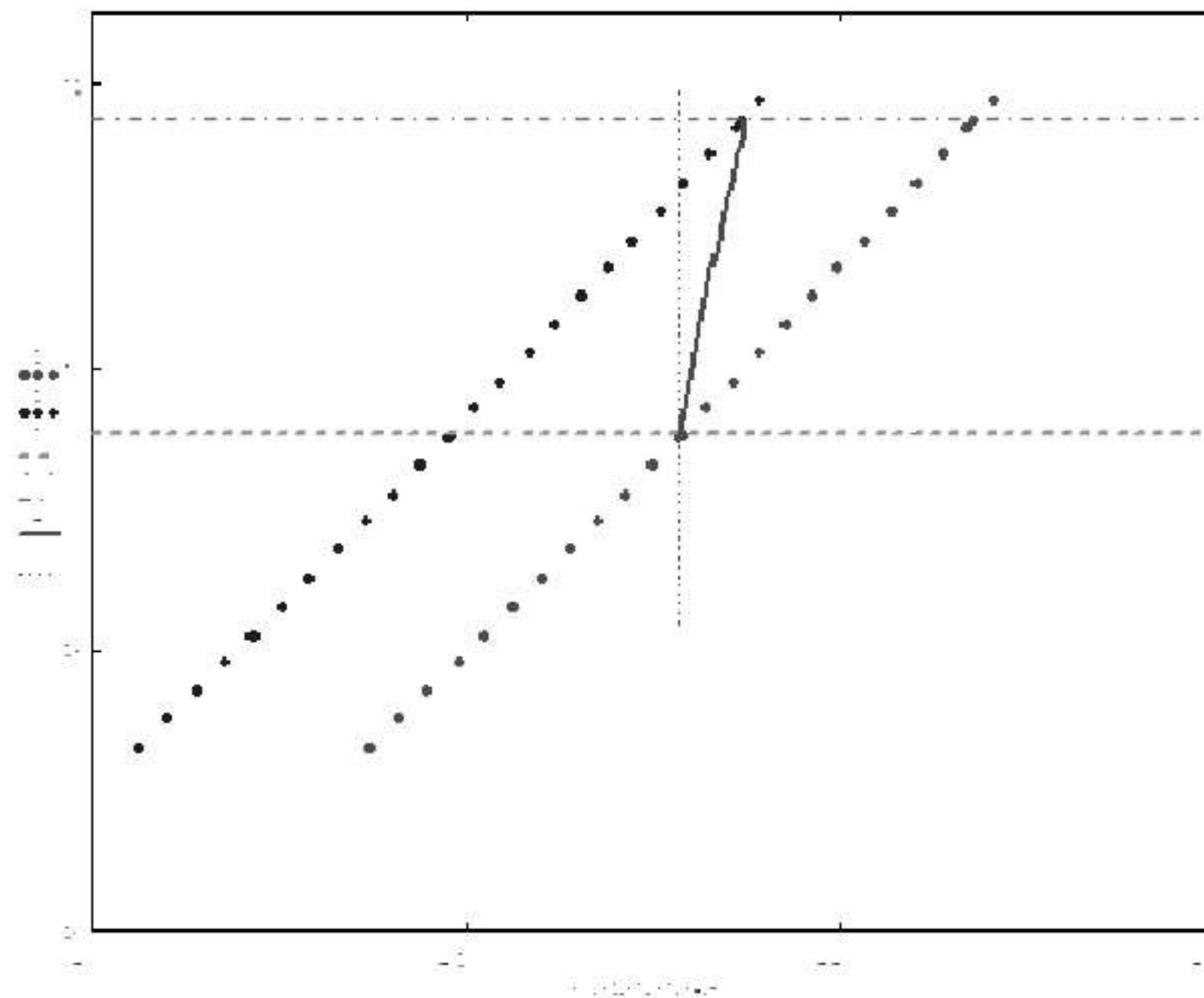
$T4 =$

$P =$

$$S4 := cv \cdot \ln \left(\frac{T4^k}{Pser^{k-1}} \right) =$$

$T5 := 281.8..320$

$$S5 := cv \cdot \ln \left[\frac{317.5^k}{(Pn)^{k-1}} \right] = 4.346 \times 10^3$$



$$A1 := (S1_{12} - S2_{12}) \cdot T2_{12} = 3.658 \times 10^4$$

$$A2 := (S2_{24} - S1_{12}) \cdot T2_{12} = 9.304 \times 10^3$$

$$T6 := \left(\frac{S1_{12}}{e^{cv} \cdot Pn^{k-1}} \right)^{\frac{1}{k}} = 312.846$$

$$A3 := \frac{1}{2} \cdot (S1_{12} - S2_{12}) \cdot (T6 - T2_{12}) = 1.093 \times 10^3$$

$$A4 := (T6 - T2_{12}) \cdot (S2_{24} - S1_{12}) = 556.182$$

$$A5 := \frac{1}{2} \cdot (S2_{24} - S1_{12}) \cdot (T2_{24} - T6) = 73.346$$

$$A6 := \frac{1}{2} \cdot (S2_{24} - S1_{12}) \cdot (T2_{24} - T2_{12}) = 351.437$$

$$Ltr := A2 + A6 = 9.656 \times 10^3$$

$$Lad := A1 + A3 = 3.767 \times 10^4$$

$$LdL := A4 + A5 - A6 = 278.091$$

$$Lpol := Lad + LdL = 3.795 \times 10^4$$

$$Lef := Lpol + Ltr = 4.761 \times 10^4$$

$$pol := \frac{Lpol}{Lpol - R \cdot (T2_{24} - T2_{12})} = 1.424$$

$$\eta_{ad} := \frac{Lad}{Lef} \cdot 100 = 79.134$$

$$\eta_i := \frac{Lpol}{Lef} \cdot 100 = 79.718$$

**Розрахунок добових значень показника політропи процесу стиснення
в нагнітачі** $\text{CH}_4 := 95.2834$ $\text{C}_2\text{H}_6 := 2.692$ $\text{C}_3\text{H}_8 := 0.838$ $\text{C}_4\text{H}_{10} := 0.253$ $\text{C}_5\text{H}_{12} := 0.041$ $\text{C}_6\text{H}_{14} := 0.0152$ $\text{O}_2 := 0.0034$ $\text{N}_2 := 0.640$ $\text{CO}_2 := 0.234$ $i := 0..23$ $T_{\text{norm}} := 273$ $T_{\text{st}} := 293$

$Pvs_i :=$	$Pnag_i :=$	$Tvs_i :=$	$Tn_i :=$
$5.02 \cdot 10^6$	$6.51 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.10 \cdot 10^6$	$6.57 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.10 \cdot 10^6$	$6.58 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.15 \cdot 10^6$	$6.63 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.17 \cdot 10^6$	$6.66 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.19 \cdot 10^6$	$6.68 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.20 \cdot 10^6$	$6.70 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.21 \cdot 10^6$	$6.72 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.22 \cdot 10^6$	$6.74 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.23 \cdot 10^6$	$6.75 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.22 \cdot 10^6$	$6.75 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.21 \cdot 10^6$	$6.74 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.20 \cdot 10^6$	$6.74 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.19 \cdot 10^6$	$6.73 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.16 \cdot 10^6$	$6.70 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.14 \cdot 10^6$	$6.68 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.13 \cdot 10^6$	$6.66 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.13 \cdot 10^6$	$6.65 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.12 \cdot 10^6$	$6.64 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.11 \cdot 10^6$	$6.63 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.11 \cdot 10^6$	$6.63 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.10 \cdot 10^6$	$6.62 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.10 \cdot 10^6$	$6.62 \cdot 10^6$	25.1	48.7
$5.10 \cdot 10^6$	$6.62 \cdot 10^6$	25.1	48.7

$T_{\text{wfl}} :=$

0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
19
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
43
44
46
48
50

$T1 := T + 273 =$

	0
0	273
1	275
2	277
3	279
4	281
5	283
6	285
7	287
8	289
9	291
10	292
11	293
12	295
13	297
14	299
15	301
16	303
17	305
18	307
19	309
20	311
21	313
22	315
23	316
24	317
25	319
26	321
27	323

$$S1_i := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T1)^k}{(Pvs_i)^{k-1}} \right]$$

$$S2_i := Cv \cdot \ln \left[\frac{T1^k}{(Pnag_i)^{k-1}} \right]$$

$$dP1_i := \frac{Pnag_i - Pvs_i}{24} = \dots$$

$$P0_0 := Pvs_c$$

$$i3 := 1..24$$

$$(P0)_{i3} := P0_{i3-1} + dP1_0$$

$$i2 := 0..24$$

$$T2_{i2} := \quad k := \frac{Cp}{Cv} = 1.31$$

298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322

$$S5_0 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P0)^{k-1}} \right] \quad S5_1 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P1)^{k-1}} \right] \quad S5_2 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P2)^{k-1}} \right]$$

$$S5_3 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P3)^{k-1}} \right] \quad S5_4 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P4)^{k-1}} \right] \quad S5_5 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P5)^{k-1}} \right]$$

$$S5_6 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P6)^{k-1}} \right] \quad S5_7 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P7)^{k-1}} \right] \quad S5_8 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P8)^{k-1}} \right]$$

$$S5_9 := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P9)^{k-1}} \right] \quad S5_{10} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P10)^{k-1}} \right] \quad S5_{11} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P11)^{k-1}} \right]$$

$$S5_{12} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P12)^{k-1}} \right] \quad S5_{13} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P13)^{k-1}} \right] \quad S5_{14} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P14)^{k-1}} \right]$$

$$S5_{15} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P15)^{k-1}} \right] \quad S5_{16} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P16)^{k-1}} \right] \quad S5_{17} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P17)^{k-1}} \right]$$

$$S5_{18} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P18)^{k-1}} \right] \quad S5_{19} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P19)^{k-1}} \right] \quad S5_{20} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P20)^{k-1}} \right] \quad S5_{21} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P21)^{k-1}} \right]$$

$$S5_{22} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P22)^{k-1}} \right] \quad S5_{23} := Cv \cdot \ln \left[\frac{(T2)^k}{(P23)^{k-1}} \right]$$

$$T4_{i3} := \left[e^{\frac{(S1_{i3})_{10}}{Cv}} \cdot (Pnag_{i3})^{k-1} \right]^{\frac{1}{k}}$$

$$F1_0 := \left[(S1_0)_{10} - (S2_0)_{10} \right] \cdot T1_{10} = 3.833 \times 10^4$$

$$F2_0 := \frac{1}{2} \cdot \left[(S1_0)_{10} - (S2_0)_{10} \right] \cdot (T4_0 - T1_{10}) = 1.216 \times 10^3$$

$$Lad_0 := F1_0 + F2_0 = 3.955 \times 10^4$$

$$F3_0 := \left[(S2_0)_{23} - (S1_0)_{10} \right] \cdot T4_0 = 1.159 \times 10^4$$

$$F4_0 := \frac{1}{2} \cdot \left[(S2_0)_{23} - (S1_0)_{10} \right] \cdot (T1_{23} - T4_0) = 102.164$$

$$F5_0 := \frac{1}{2} \cdot \left[(S2_0)_{23} - (S1_0)_{10} \right] \cdot (T1_{23} - T1_{10}) = 447.751$$

$$F6_0 := \left[(S2_0)_{23} - (S1_0)_{10} \right] \cdot T1_{10} = 1.09 \times 10^4$$

$$Ldl_0 := (F3_0 + F4_0) - (F5_0 + F6_0) = 345.587$$

$$Lpol_0 := Lad_0 + Ldl_0 = 3.99 \times 10^4$$

$$Ltr_0 := F5_0 + F6_0 = 1.134 \times 10^4$$

$$Le_0 := Lad_0 + Ldl_0 + Ltr_0 = 5.124 \times 10^4$$

$$\eta_{ad_0} := \frac{Lad_0}{Le_0} \cdot 100 = 77.188$$

$$\eta_{i_0} := \frac{Lpol_0}{Le_0} \cdot 100 = 77.862$$

$$n_0 := \frac{Lpol_0}{Lpol_0 - R \cdot (T1_{23} - T1_{10})} = 1.439$$

	0
0	$3.955 \cdot 10^4$
1	$3.851 \cdot 10^4$
2	$3.875 \cdot 10^4$
3	$3.84 \cdot 10^4$
4	$3.851 \cdot 10^4$
5	$3.837 \cdot 10^4$
6	$3.854 \cdot 10^4$
7	$3.87 \cdot 10^4$
8	$3.887 \cdot 10^4$
9	$3.88 \cdot 10^4$
10	$3.91 \cdot 10^4$
11	$3.915 \cdot 10^4$
12	$3.947 \cdot 10^4$
13	$3.954 \cdot 10^4$
14	$3.975 \cdot 10^4$
15	...

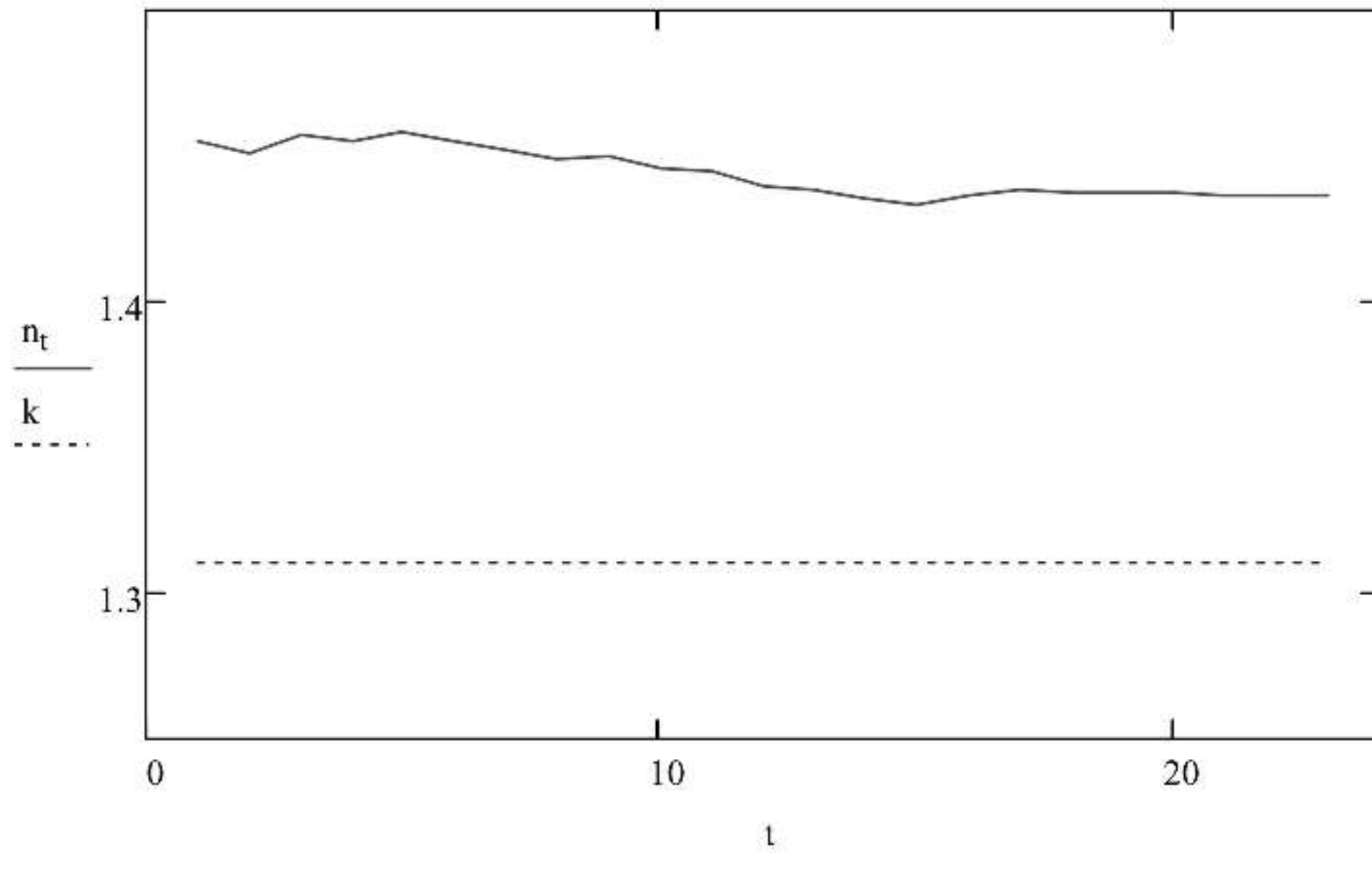
Lad =

	0
0	$3.99 \cdot 10^4$
1	$3.888 \cdot 10^4$
2	$3.911 \cdot 10^4$
3	$3.877 \cdot 10^4$
4	$3.887 \cdot 10^4$
5	$3.874 \cdot 10^4$
6	$3.89 \cdot 10^4$
7	$3.907 \cdot 10^4$
8	$3.923 \cdot 10^4$
9	$3.916 \cdot 10^4$
10	$3.946 \cdot 10^4$
11	$3.95 \cdot 10^4$
12	$3.982 \cdot 10^4$
13	$3.989 \cdot 10^4$
14	$4.009 \cdot 10^4$
15	...

Lpol =

	0
0	1.439
1	1.455
2	1.451
3	1.457
4	1.455
5	1.458
6	1.455
7	1.452
8	1.449
9	1.45
10	1.446
11	1.445
12	1.44
13	1.439
14	1.435
15	...

n =



Розрахунок параметрів роботи АПО

$$t_{pov1} := 40$$

$$t_{1m} := 65$$

$$t_{2m} := 43.6$$

$$c_{pm} := 2035$$

$$G_{mv} := 37.8$$

$$\rho_m := 848 \quad \text{при } 60 \text{ C}$$

$$n := 1 \quad \text{кількість АПО}$$

$$Q_m := 290$$

$$G_{mvs} := \frac{G_{mv}}{3600} = 0.011$$

$$G_{mms} := G_{mvs} \cdot \rho_m = 8.904$$

$$t_{2m} := t_{1m} - \frac{Q_m \cdot 10^3}{G_{mvs} \cdot \rho_m \cdot c_{pm}} = 48.995$$

$$G_{pv} := 13340 \cdot 4 = 5.336 \times 10^4$$

$$P_n := 1.038$$

$$P_{n1} := P_n \cdot 98066.5 = 1.018 \times 10^5$$

$$T_n := t_{pov1} + 273 = 313$$

$$\rho_{st} := 1.204 \quad T_{st} := 293$$

$$\rho_n := \rho_{st} \cdot \frac{P_{n1} \cdot T_{st}}{P_{st} \cdot T_n} = 1.132$$

$$c_{pp} := 1237$$

$$G_{pm} := \frac{G_{pv} \cdot \rho_n}{3600} = 16.783$$

$$t_{pov2} := t_{pov1} + \frac{Q_m \cdot 10^3}{G_{pm} \cdot c_{pp}} = 53.969$$

$$P_{st} := 101321$$

$$F := 1120$$

$$\theta_1 := t_{1m} - t_{pov2} = 11.031$$

$$\theta_2 := t_{2m} - t_{pov1} = 8.995$$

$$Q_m = 290$$

$$E := 1 - 0.022 \cdot e^{\frac{t_{1m} - t_{2m}}{t_{1m} - t_{pov2}}} = 0.906$$

$$\Delta t := \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} \cdot E = 9.042$$

$$k := \frac{Q_m \cdot 10^3}{F \cdot \Delta t} = 28.637$$

$$\Delta t_r := \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = 10.013$$

$$k_2 := \frac{Q_m \cdot 10^3}{F \cdot \Delta t_r} = 25.859$$

$$t_{1m2} := 84.6$$

$$t_{2m2} := 43.6 \quad cpm = 2.035 \times 10^3$$

$$t_{1pov} := 30$$

$$G_m := 2$$

$$Q_{m2} := G_m \cdot cpm \cdot (t_{1m2} - t_{2m2}) = 1.669 \times 10^5$$

$$\frac{G_{pv} \cdot \rho_n}{3600} = 16.783$$

$$t_{2pov2} := t_{1pov} + \frac{Q_{m2}}{\frac{G_{pm}}{2} \cdot c_{pp}} = 46.076 \quad G_{pm} = 16.783 \quad \frac{G_{pm}}{2} = 8.391$$

$i2 := 0..6$

$tpov_{i2} :=$

-30
-20
-10
0
10
20
30

$d := 25$

$Pr := 0.70$

$\beta := \frac{1}{303}$

$tm := 64.1$

$$ts := \left[\frac{1}{2} \cdot (tm + tpov) \right] = \begin{pmatrix} 17.05 \\ 22.05 \\ 27.05 \\ 32.05 \\ 37.05 \\ 42.05 \\ 47.05 \end{pmatrix}$$

$\lambda_{i2} :=$	$Pr_{i2} :=$	$v_{i2} :=$
0.022	0.723	$10.8 \cdot 10^{-6}$
0.0228	0.716	$11.61 \cdot 10^{-6}$
0.0236	0.712	$12.43 \cdot 10^{-6}$
0.0244	0.707	$13.28 \cdot 10^{-6}$
0.0251	0.705	$14.16 \cdot 10^{-6}$
0.0259	0.703	$15.06 \cdot 10^{-6}$
0.0267	0.701	$16 \cdot 10^{-6}$

$$Gr := \frac{\beta \cdot (d \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9.81 \cdot (ts - tpov)}{v^2} = \begin{pmatrix} 2.041 \times 10^5 \\ 1.578 \times 10^5 \\ 1.213 \times 10^5 \\ 9.193 \times 10^4 \\ 6.825 \times 10^4 \\ 4.918 \times 10^4 \\ 3.369 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$P := (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) = \begin{pmatrix} 1.475 \times 10^5 \\ 1.13 \times 10^5 \\ 8.637 \times 10^4 \\ 6.5 \times 10^4 \\ 4.811 \times 10^4 \\ 3.457 \times 10^4 \\ 2.362 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$\alpha_{i2} := \frac{\text{Nu}_{i2} \cdot \lambda_{i2}}{d \cdot 10^{-3}}$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} 8.623 \\ 8.36 \\ 8.092 \\ 7.792 \\ 7.435 \\ 7.063 \\ 6.62 \end{pmatrix}$$

$$Q_{\text{dod}}_{i2} := Q_{m2} - Q_{i2}$$

$$Q_{i2} := \alpha_{i2} \cdot \frac{1120}{2} \cdot (t_{s_{i2}} - t_{\text{pov}_{i2}})$$

$$Q_{\text{dod}} = \begin{pmatrix} -6.034 \times 10^4 \\ -3 \times 10^4 \\ -1.015 \times 10^3 \\ 2.702 \times 10^4 \\ 5.425 \times 10^4 \\ 7.965 \times 10^4 \\ 1.037 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 2.272 \times 10^5 \\ 1.969 \times 10^5 \\ 1.679 \times 10^5 \\ 1.398 \times 10^5 \\ 1.126 \times 10^5 \\ 8.722 \times 10^4 \\ 6.321 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$G_{ts_{i2}} :=$$

0.05
0.05
0.05
1.049
2.098
3.147
4.196

$$\frac{G_{10}}{2} = 4.196$$

$$\Delta t_s = \begin{pmatrix} -975.562 \\ -485.078 \\ -16.407 \\ 20.823 \\ 20.903 \\ 20.461 \\ 19.972 \end{pmatrix}$$

$$\Delta t_{s_{i2}} := \frac{Q_{\text{dod}}_{i2}}{G_{ts_{i2}} \cdot \text{cpp}}$$

$\rho_{i2} :=$

1.453
1.395
1.342
1.293
1.247
1.205
1.165

$$GQ3 := \frac{Q_{dod3}}{c_{pp} \cdot \Delta t_{s3}} = 1.049$$

$$V3 := \frac{GQ3}{\rho_3} = 0.811$$

$$GQ4 := \frac{Q_{dod4}}{c_{pp} \cdot \Delta t_{s4}} = 2.098$$

$$V4 := \frac{GQ4}{\rho_4} = 1.682$$

$$GQ5 := \frac{Q_{dod5}}{c_{pp} \cdot \Delta t_{s5}} = 3.147$$

$$V5 := \frac{GQ5}{\rho_5} = 2.612$$

$$GQ6 := \frac{Q_{dod6}}{c_{pp} \cdot \Delta t_{s6}} = 4.196$$

$$V6 := \frac{GQ6}{\rho_6} = 3.602$$

$$n3 := \frac{V3 \cdot 1600}{G_v} = 350.303$$

$$n4 := \frac{V4 \cdot 1600}{G_v} = 726.45$$

$$n5 := \frac{V5 \cdot 1600}{G_v} = 1.128 \times 10^3$$

$$n6 := \frac{V6 \cdot 1600}{G_v} = 1.555 \times 10^3$$

$i3 := 0..3$

$T_{wi3} :=$

0
10
20
30

$GQ_{i3} :=$

350
726
1128
1555

