

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: Впровадження енергозберігаючих технологій на компресорній
станції м. Ромни**

Виконавець: студент ГУ-210 М

Мельник Олександр 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 Олександра Сергійовича

1. Тема роботи: «Впровадження енергозберігаючих технологій на компресорній станції м. Ромни» затверджена наказом ректора від 25.09.19 № 2187/ст.

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

3. Вихідні дані роботи: технологічна схема та параметри режимів роботи КС-32 «П» м. Ромни.

4. Зміст пояснювальної записки: реферат, зміст, перелік умовних скорочень, аналіз сучасного стану компресорної станції КС-32 «П» м. Ромни, визначення ефективності роботи ГПА КС-32 «П» м. Ромни, охорона навколишнього середовища, охорона праці, висновки.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: креслення рекуперативного теплообмінника системи «газ-газ», плакати: технічні характеристики теплообмінника системи «газ-газ», T-S діаграма технологічного процесу компримування природного газу в решітці ротора відцентрового нагнітача ЦН 650-22-2, зміна адіабатичної та політропної роботи стиснення, графік залежності температури паливного газу на виході з рекуперативного теплообмінника системи «газ-газ».

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-32 «П» м. Ромни.	11.11.19– 30.11.19	
3.	Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 650-22-2 КС-32 «П» м. Ромни.	30.11.19– 08.11.19	
4.	Розрахунок роботи рекуперативного теплообмінника КС-32 «П» 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: _____ О.С. Мельник
(підпис випускника)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Впровадження енергозберігаючих технологій на компресорній станції м. Ромни»: 121 сторінка, 24 таблиці, 14 рисунків, 20 використаних джерела, 9 додатків.

Об'єкт дослідження – ГПА КС-32 «П», нагнітач ЦН 650-22-2, рекуперативний теплообмінник системи «газ-газ».

Предмет дослідження – ефективність роботи ГПА КС-32 «П» в тому числі нагнітача ЦН 650-22-2, та вплив фізико-хімічних параметрів паливного газу на роботу блоку підготовки паливного газу.

Мета дипломної роботи – визначення ефективності роботи ГПА КС-32 «П» в процесі перекачки природного газу та можливість використання роботи теплового опору та роботи сил тертя для підігріву паливного газу.

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 підігріву паливного газу з застосуванням рекуперативного теплообмінника приводить до підвищення ККД роботи ГПА шляхом використання, як теплоносія природного газу після компримування та значної економії природного газу на власні потреби шляхом виключення з роботи підігрівачів ПГ-30.

КОМПРЕСОРНА СТАНЦІЯ КС-32 «П» м. РОМНИ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ
ТЕХНОЛОГІЇ, ПІДГРІВАЧ ПАЛИВНОГО ГАЗУ, РЕКУПЕРАТИВНИЙ
ТЕПЛООБМІННИК

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ КС-32 «П» м. РОМНИ	10
1.1. Загальна характеристика компресорної станції	10
1.2. Аналіз основного технологічного обладнання КС	11
1.2.1. Блок очистки та осушування технологічного газу	11
1.2.2. Аналіз компоновки ГПА-25 МН80.02.....	13
1.2.3. Апарат повітряного охолодження технологічного газу 2АВГ-75	15
1.3. Аналіз впровадження енергозберігаючих технологій на КС-32 «П» м. Ромни.....	17
1.3.1. Аналіз конструкції двигуна ДН-80Л.....	18
1.3.2. Аналіз конструкції та принципу роботи підігрівача паливного газу ПГ-30.....	23
1.3.3. Аналіз конструкції рекуперативного теплообмінника системи «газ-газ».....	26
Висновки за розділом	28
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГПА КС-32 «П» м. РОМНИ.....	29
2.1. Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу.....	29
2.2. Розрахунок показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 650-22-2 КС-32 «П».....	34
2.3. Розрахунок добових значень показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 650-22-2 КС-32 «П».....	40
2.4. Тепловий розрахунок теплообмінника системи «газ-газ»	45

Висновки за розділом	56
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	57
3.1. Вплив викидів забруднюючих речовин на навколишнє середовище та людину.....	57
3.2. Розрахунок викидів забруднюючих речовин.....	61
3.3. Економічна оцінка збитку від забруднення атмосфери	64
3.4. Заходи для зменшення викидів оксиду азоту та вуглецю	67
Висновки за розділом	68
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	69
4.1. небезпечні і шкідливі виробничі фактори, які можуть впливати на працівників в умовах КС	69
4.2. Вплив шкідливих факторів на людину та конструктивні рішення і заходи зменшення їх впливу.....	70
4.3. Розрахунок освітлення приміщення головного щита управління КС.....	76
4.4. Пожежо- і вибухонебезпека при роботі на КС	80
4.5. Інструкція з техніки безпеки оператора МГ.....	82
Висновки за розділом	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	87
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В	
Додаток Г	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЛВУ МГ – лінійне виробниче управління магістральних газопроводів;

ГПА – газоперекачувальний агрегат;

МГ – магістральний газопровід;

КС – компресорна станція;

ГРС – газорозподільча станція;

ВЦН – відцентровий нагнітач;

ГТД – газотурбінний двигун;

САК – система автоматичного керування;

СТ – силова турбіна;

АПО – апарат повітряного охолодження;

БПППГ – блок підготовки паливного, пускового та імпульсного газу;

КНТ – компресор низького тиску;

ТНТ – турбіна низького тиску;

ТВТ – турбіна високого тиску;

РЛ – робоча лопатка;

СЛ – спрямляюча лопатка;

ВНА – вхідний направляючий апарат;

СА – спрямляючий апарат;

ТКВТ – турбокомпресор високого тиску;

НА – направляючий апарат;

КЗ – камера згоряння.

ВСТУП

Компресорна станція (КС) являє собою одну із найважливіших складових газотранспортної системи, тому забезпечення її безвідмовної роботи та підтримки режиму роботи магістральних газопроводів (МГ) є одним з ключових завдань експлуатуючого персоналу. Вона є складним технологічним об'єктом, ключовою складовою якої є газоперекачувальний агрегат (ГПА), що безпосередньо забезпечує транспорт газу, і для підвищення надійності її роботи, на майданчику встановлено різноманітне технологічне обладнання. Проте застарілість наявного оснащення, що було розроблено та введено в експлуатацію за часів Радянського союзу, не може забезпечити, як надійну роботу КС так і її енергоефективність. Більшість встановленого обладнання розроблено відповідно до норм та вимог тих часів, коли особливо не загострювалась увага на енергоефективності, та у зв'язку з нинішніми світовими тенденціями, як в галузі екології так і в галузі ведення економічної діяльності підприємств, впровадження енергозберігаючих технологій на КС є важливим питанням.

Розвиток напрямку енергозбереження допоможе знизити неефективні витрати енергоносіїв, зокрема витрати природного газу на власні потреби. Використання природного газу на власні потреби пов'язане з забезпеченням технологічного процесу транспортування газу до споживача. Серед витрат газу на власні потреби можна виділити такі від яких позбутися неможливо, але можливо зменшити їх кількість, та такі яких можливо позбутися повністю за рахунок впровадження нового енергоефективного обладнання.

В умовах КС, за рахунок проведення модернізації ГПА та блоку підготовки паливного, пускового та імпульсного газу (БПППГ), можливо:

- зменшити витрати паливного газу, шляхом модернізації двигуна та нагнітача;
- позбутись від витрат пускового газу на пуск ГПА турбодетандерами, шляхом встановлення електростартерів;

- позбутись витрат газу для підігріву паливного, що використовується двигуном ГПА.

Підігрів газу обумовлений процесом падінням температури газу та можливим утворенням кристалогідратів під час дроселювання паливного газу, від тиску з яким він надходить до КС до тиску, який передбачений конструкцією двигуна. На більшості КС, під час процесу підготовки паливного газу, перед дроселюванням, його підігрівають за допомогою підігрівачів типу ПГ-30, що використовують в якості палива природний газ та спалюючи його підігрівають теплом, що виділилось в процесі горіння, паливний газ ГПА.

Встановивши рекуперативні теплообмінники за допомогою яких можна підігрівати паливний газ використовуючи в якості теплоносія теплий компримований природний газ після нагнітача. За рахунок такої модернізації можливе відключення від роботи підігрівачів газу типу ПГ-30 та використання їх лише в якості резервних та при пуску ГПА. Теплообмінники дозволяють використовувати тепло, що надійшло до технологічного газу під час компримування, за рахунок перетворення роботи теплового опору та роботи сил тертя.

Аналіз впровадження енергозберігаючих технологій та розрахунки проводились на базі КС-32 «П» м. Ромни.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ КС-32 «П» м. РОМНИ

1.1. Загальна характеристика компресорної станції

Сумське лінійне виробниче управління магістральних газопроводів (ЛВУ МГ) створеного в 1983 році відповідно до листа Мінгазпрому від 10.10.1983 року № 13Д-538, на підставі наказу ВВО «Укргазпром» від 03.11.1983 року №279 і наказу ВО «Київтрансгаз» від 21.11.1983р. №306. На сьогодні це найбільше за встановленою потужністю газоперекачувальних агрегатів (ГПА) (296 МВт) управління в ТОВ «Оператор ГТС України». Підприємством транспортується понад 80% експортного газу з Росії в Європу [1].

Після створення Сумського ЛВУ МГ процес будівництва МГ та КС пришвидшився. За 1983-1989 роки збудовано і введено в дію п'ять ниток МГ діаметром 1220-1420 мм протяжністю біля 785 км і 5 КС, які було організовано в 2 проммайданчики – Ромненський (3 газопроводи і 3 КС) і Сумський (2 газопроводи і 2 КС). Крім МГ Сумське ЛВУ МГ експлуатує 39 автоматичних газорозподільчих станцій (ГРС), що розташовані на газопроводах-відгалуженнях загальною довжиною 435 км.

КС-32 «П» введена в експлуатацію у 1989 р. Розташована на 3514,8 км газопроводу «Прогрес». На КС-32 «П» встановлено три ГПА-25МН80.02. В якості приводу відцентрових нагнітачів (ВЦН) використовуються газотурбінні двигуни (ГТД) ДН-80Л, ефективною потужністю 25 МВт, виробництва ДП НКВГ «Зоря»-«Машпроект», що дозволяє забезпечити пропускну здатність КС в 90 млн. м³ на добу. Тип ВЦН, встановлених на даному типу ГПА, ЦН 650-22-2 виготовлені на Невському заводі в м. Ленінград [2].

Будівництво газопроводу завершилось у 1988 році. Газопровід забезпечує транспортування газу з Ямбургського родовища до країн Західної Європи, а саме до Словачії, Чехії, Австрії, Германії, Франції та інших. Його протяжність через територію України складає 1160 км, а маршрут проходження співпадає з

поток «Уренгой – Помари – Ужгород», потужність – 26 млрд. м³ в рік. Діаметр газопроводу 1420 мм, робочий тиск 75 бар. На території України газопровід обслуговують 9 КС («Ромненська», «Гребінківська», «Софіївська», «Ставищенська», «Іллінці», «Бар», «Гусятин», «Богородчани», «Ужгород») [3].

Схема проходження газопроводу зображена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Схема проходження газопроводу «Прогрес»

1.2. Аналіз основного технологічного обладнання КС

1.2.1. Блок очистки та осушування технологічного газу

При подачі і транспортуванні в природному газі містяться різного роду механічні домішки такі як: пісок, зварний шлам, конденсат тяжких вуглеводнів, вода, оливи і інші. Джерелом забруднення природного газу є привибійна зона, що поступово руйнується. Підготовка газу здійснюється на промислах від ефективності роботи яких і залежить якість газу. Механічні домішки також потрапляють в газопровід, як під час будування так і під час експлуатації.

Наявність таких домішок і конденсату газу приводить до передчасного зношення трубопроводу, запірної арматури, робочого колеса нагнітача і як наслідок до зниження показників надійності та економічності роботи КС і в цілому газопроводу [4].

Виникає потреба в підготовці технологічного газу до стиснення і транспортування газопроводом тому на КС встановлено вузол очищення технологічного газу від механічних домішок, води та вуглеводневого конденсату, який включає в себе пиловловлювачі та фільтр-сепаратори.

Пиловловлювачі призначені для очистки природного газу від механічних домішок і рідин. Встановлюються на компресорних станціях магістральних газопроводів. Очистка газу здійснюється за допомогою контактних пристроїв циклонного типу. Матеріал виготовлення – низьколегована сталь. Пиловловлювачі призначені для експлуатації в умовах холодного і помірного кліматичних районів і також можуть виготовлятися в блочному виконанні[].

Пиловловлювачі вертикальні циклонного типу, виготовлені на «Чернівецький машинобудівний завод» та введенні в експлуатацію в 1988 р (рис. 1.3). Пропускна здатність одного пиловловлювача складає 20 млн. м³/добу, внутрішній діаметр – 2000 мм, а об'єм складає 5,2 м³. Всього встановлено 6 таких пиловловлювачів на даній КС [5].



Рис. 1.2. Пиловловлювачі виробництва «Чернівецький машинобудівний завод»

Блоки фільтр-сепараторів призначені для підвищення степені очистки природного газу від механічних домішок і крапельних рідин, які є причиною ерозії технологічного обладнання і трубопроводів компресорних станцій.

Об'єм одного фільтр-сепаратора 20 м^3 , а внутрішній діаметр 1600 мм . Для забезпечення продуктивності КС встановлено 8 фільтр-сепараторів виготовлених ВО «Дзержинськхіммаш» [6].



Рис. 1.3. Фільтр-сепаратори виробництва ВО «Дзержинськхіммаш»

1.2.2. Аналіз компоновки ГПА-25 МН80.02

Агрегат скомпонований в процесі модернізації ГПА-25/76 ПО «Невский завод» шляхом заміни двигуна ГТН-25 на ДН-80Л заводу НПО «Зоря» – «Машпроект» м. Миколаїв [2].

Газоперекачувальний агрегат ГПА-25МН80.02 виготовляється в кліматичному виконанні УХЛ 4 відповідно до ГОСТ 15150-69 і може експлуатуватись при температурі повітря від 218 К (-55 C°) до 318 К ($+45 \text{ C}^\circ$) і відносній вологості повітря до 100% при 288 К ($+15 \text{ C}^\circ$), а також за наявності опадів (сніг, дощ, туман) і при температурі повітря в приміщенні ГПА від 278 К ($+5 \text{ C}^\circ$) до 323 К ($+50 \text{ C}^\circ$).

ГПА-25МН80.02 складається з блоку двигуна ДН-80Л і нагнітача ЦН 650-22-2.

ГТД ДН-80Л розроблений і виготовляється державним підприємством «Зоря»-«Машпроект». Конструкція ГТД забезпечує його роботу в складі ГПА на усіх режимах без постійної присутності обслуговуючого персоналу. ГТД пристосований для роботи з системою автоматичного керування (САК) на базі програмно-технічного середовища Series 4 фірми «Compressor Controls

Corporation», яка виконує функції регулювання, керування, захисту і контролю, що поєднується з наявною на КС САК А705-15-01М.

Установлений ресурс до заводського ремонту двигуна 25000 годин. Термін служби ДН-80Л – 25 років. Високоякісні матеріали й сплави, використані в конструкції ДН-80Л, забезпечують високу надійність і тривалий термін служби.

Номінальна потужність двигуна при стандартних атмосферних умовах ($T_{ст} = 288 \text{ К}$, $p_{ст} = 101325 \text{ Па}$) складає 25 МВт, а максимальна потужність двигуна при температурі повітря на вході в двигун нижче $T_H = 268 \text{ К}$ складає 30 МВт. Коефіцієнт корисної дії двигуна в станційних умовах на номінальному режимі не менше 34,5%.

В якості паливного газу використовується природний газ, що транспортується і відповідає вимогам ГОСТ 5542-87. Номінальна витрата паливного газу – 5400 кг/год ($7648,7 \text{ м}^3/\text{год}$ за стандартних умов), максимальна витрата паливного газу – 6000 кг/год ($8498,6 \text{ м}^3/\text{год}$ за стандартних умов), тиск паливного газу становить 29,4 бар. Час нормального запуску ГПА не більше 30 хвилин.

Об'ємна продуктивність нагнітача (при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 101325 Па) становить 47 млн. $\text{м}^3/\text{добу}$. Кінцевий тиск газу при виході з нагнітаючого патрубку 75 бар, а мінімальний тиск газу при вході в всмоктувальний патрубок 52 бар. Температура газу при виході з нагнітаючого патрубку $41 \text{ }^\circ\text{C}$. Номінальна частота обертання ротора нагнітача 3700 об/хв [2].

ВЦН типу 650 являє собою повнонапірну двоступеневу відцентрову машину, яка призначена для паралельної схеми роботи на КС. Нагнітач змонтований на рамі разом з допоміжним обладнанням і первинними датчиками і являє собою транспортно-монтажний блок.

Відцентровий нагнітач слугує для стиснення природного газу і його перекачки по МГ.

Корпус нагнітача виготовляється з високоякісних конструкційних сталей. Корпус зварно-литий, який закривається з торцевих сторін кришками, які

кріпляться до корпусу шпильками.

Ротор нагнітача зборної конструкції має кований вал і ковану основу коліс на яких фрезеруються лопатки спірального типу. Лопатки закриваються кришками, які кріпляться клепоквим або зварним з'єднанням. Колеса надійно з натягом насаджені на вали і кріпляться шпонками. Кожний ротор складається з необхідного числа коліс, шийок під опорні підшипники, упорного диску під упорний підшипник, диску реле осьового зміщення, спеціальних виступів і буртів під ущільнення і муфти для з'єднання з ротором силової турбіни (СТ).

Перед кожним колесом передбачено вхідний конфузур типу равлик. Ця конструкція асиметричної форми за рахунок якої газ направляється в колеса нагнітача. На виході з кожного колеса встановлено вихідні дифузори, де газ стискається. Колесо нагнітача з обох сторін ущільнюється.

Вібро- і термодатчики нагнітача мають зовнішню установку.

Нагнітач має автономну мастильну систему. Приводом насоса ущільнення є вал нагнітача, а насоса змащення –СТ.

Всі нагнітачі з приводом від ГТД забезпечують стійку роботу в діапазоні частот обертання 0,7 – 1,05 від номінальної.

Система захисту, керування, контролю сигналізації і автоматичного регулювання є спільними для приводу та нагнітача.

1.2.3. Апарат повітряного охолодження технологічного газу 2АВГ-75

Для охолодження технологічного газу на виході з ГПА використовуються апарати повітряного охолодження газу (АПО) 2АВГ-75 [7] .

Апарати являють собою горизонтально розташовані три теплообмінні секції. Кожна секція являється набором із оребрених біметалічних труб об'єднаних в 6 рядів.

Охолодження природного газу здійснюється за рахунок охолодження поверхні труб повітрям, що подається двома осьовими вентиляторами знизу вгору: повітря проходячи міжтрубним простором, забирає тепло, тим самим

охолоджуючи природний газ.

Кліматичне виконання апарату У1 і УХЛ1 за ГОСТ 15150-69. Металічна несуча конструкція призначена для установки апаратів в районах з сейсмічністю до 7 балів і швидкісним напором за 4 географічним районом.

Всього встановлено 14 секцій.

Основні характеристики однієї секції даного АПО:

- тиск охолоджуваного середовища – 75 атм.;
- загальна площа поверхні теплообміну - 9730 м²;
- довжина оребреної труби – 12 м;
- потужність електродвигуна вентилятора – 37 кВт;
- діаметр колеса вентилятора – 4,45 м;
- кількість вентиляторів в одній секції – 2.

АПО розраховані на тиск охолоджуваного середовища до 120 атм, а також конструкція дозволяє змінювати кут установки лопатей вентилятора від 0° до 25°.



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд АПО 2АВГ-75

1.3. Аналіз впровадження енергозберігаючих технологій на КС-32 «П» м. Ромни

На КС-32 «П» було проведено модернізацію під час, якої за основні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій було обрано наступні:

- заміна двигуна ГТН-25 на ДН-80Л з встановленням дозатора паливного газу «Amot 4280», який було розглянуто мною у дипломній роботі здобувача освітнього ступеня бакалавр [2];
- замінено підігрівач паливного газу старого зразка на новий виробництва фірми «Факел» ПГ-30;
- модернізація блоку підготовки паливного, пускового та імпульсного газу (БПППГ) шляхом встановлення двох рекуперативних теплообмінників системи «газ-газ» та заміни турбодетандерів на електростартери.

Порівняльну характеристику двох двигунів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика двигунів ГТН-25 та ДН-80Л

Параметр порівняння двигунів	ГТН-25	ДН-80Л
Потужність двигуна на номінальному режимі, МВт	25	25
ККД на номінальному режимі, %	27,8	34,5
Витрата паливного газу, т/год	7,8	5,4
Степінь підвищення тиску в компресорі	12,2	20,4
Температура газу перед турбіною, К	1160	1382

Аналізуючи наведені технічні характеристики двигунів можна побачити, що різниці коефіцієнтів корисної дії (ККД) складає 5,7%. Більш високий ККД ДН-80Л призводить до економії паливного газу 2,4 т/год, що складає близько 30%. За рахунок економії паливного газу ціна транспортування зменшується, що дозволяє підвищити ефективність економічної діяльності підприємства.

Модернізація БПППГ шляхом встановлення рекуперативних теплообмінників системи «газ-газ» дозволяє виконувати підігрів паливного газу, що використовується для роботи ГПА, за рахунок тепла компримованого природного газу. В такому випадку відпадає потреба використання підігрівачів, які спалюють природний газ для підігріву паливного. Економія газу за рахунок встановлення теплообмінників складає 1680 м³/добу, але окрім цього така модернізація підвищує надійність роботи регулятора тиску паливного газу ГПА, за рахунок виключення фактору обмерзання регулятора тиску паливного газу форсунок підігрівача типу ПГ-30. Також вагомою перевагою теплообмінника типу «газ-газ» є його екологічність, адже відсутні викиди, що притаманні процесу спалення природного газу.

Недоліком такої системи є лише те, що при запуску ГПА використання теплообмінника неможливе, тому використовується резервний підігрівач ПГ-30, що було встановлено в процесі модернізації.

Заміна турбодетандерів на електростартери дозволила зменшити викиди природного газу в атмосферу під час виконання технологічного процесу транспорту газу, що у свою чергу дозволяє покращити не тільки економічні показники, а і екологічні.

Роблячи висновки з вище наведеного можна підсумувати, що така модернізація попри її велику вартість є доцільною та дозволяє зменшити неефективні витрати природного газу на власні потреби, підвищити ККД та надійність роботи ГПА.

1.3.1. Аналіз конструкції двигуна ДН-80Л

ГТД ДН-80Л виконаний за трьоххвальною конструкцією. Газогенератор двигуна двокаскадний. Компресор низького тиску (КНТ) приводиться в рух турбіною низького тиску (ТНТ), а компресор високого тиску відповідно турбіною високого тиску (ТВТ) [2].

КНТ – осьовий, дев'ятиступеневий, кожна ступінь утворена одним рядом

робочих лопаток (РЛ) ротора і розташованих за ним поруч рядом спрямляючих лопаток (СЛ), встановлених в корпусі. КНТ складається з вхідного пристрою, переднього корпусу, приводу, поворотного вхідного направляючого апарату (ВНА), антизривного пристрою, поворотного спрямляючого апарату (СА) нульової ступені, поворотного СА першої ступені, ротора, корпусу КНТ, передньої опори КНТ з кульковим підшипником кочення і упорним підшипником ковзання, задньої опори КНТ з роликівим підшипником.

Для забезпечення стійкої роботи компресора в заданому діапазоні режимів і при запуску ГТД, КНТ має три поворотних СА, лопатки яких синхронно повертаються загальним механізмом в залежності від статичного тиску повітря в проточній частині за КВТ.

Антизривний пристрій призначений для поліпшення газодинамічних характеристик нульового ступеня.

З метою збільшення запасів стійкості КНТ на низьких режимах за шостим ступенем встановлені два клапана стравлювання.

Вхідний пристрій призначений для забезпечення плавного підведення повітря в компресор і складається із зовнішнього, внутрішнього обтікачів і проставки. Кільцевий канал, утворений обтікачами, є початком проточної частини двигуна.

Передній корпус призначений для розміщення поворотного ВНА, передньої опори КНТ і приводу.

Передня опора ротора КНТ - комбінована, складається з радіально-упорного кулькового підшипника кочення і упорного підшипника ковзання.

Привід призначений для передачі крутного моменту від електростартерів до ротора КНТ при запуску двигуна і для приводу нижньої коробки приводів з навісними агрегатами під час роботи двигуна.

Поворотний ВНА працює синхронно з поворотними СА нульового і першого ступеня компресора.

Ротор КНТ барабанно-дискової конструкції складається з барабана нульового-другого ступеня, барабана третього-сьомого ступеня, з'єднаних між

собою, задньої цапфи і навішаного диска восьмого ступеня.

КВТ дев'ятиступеневий, складається з перехідника, корпусу КВТ, силового корпусу, СА на виході з КВТ, заднього корпусу, ротора турбокомпресора високого тиску (ТКВТ).

Перехідник призначений для плавного підведення повітря з КНТ в КВТ.

Корпус КВТ призначений для установки СА КВТ.

Корпус КВТ являє собою трубу з горизонтальним роз'ємом. До середнього фланця корпусу кріпиться силовий корпус, до заднього - задній корпус.

Силовий корпус призначений для посилення конструкції двигуна, а також кріплення пальників, жарових труб, паливних колекторів і комунікацій заднього корпусу.

Ротор КВТ дев'ятиступеневий, барабанно-дискової конструкції складається з двох барабанів: першого-другого ступенів, четвертого-шостого ступенів, дисків, цапфи-диска третього ступеня, задньої цапфи.

ТВТ – осьова консольного типу, складається з соплового апарату і ротора. ТВТ призначена для приводу КВТ.

Сопловий апарат ТВТ складається з:

- силового корпусу;
- СЛ;
- направляючого апарату (НА);
- сотових вставок, встановлених в кільці регульованого зазору.

Сотові вставки, кільце регульованого зазору і розподільний екран є частиною системи регулювання радіального зазору над РЛ ТВТ.

Соплові лопатки - охолоджувані, поодинокі, двоопорні. По верхнім і нижнім буртам ущільнені сойферитовим ущільненням для зменшення втрат охолоджуючого повітря, що підводиться до лопаток.

Ротор ТВТ складається з диска, з'єднаного болтами з цапфою. Цапфа з диском встановлюється на цапфу КВТ і затягується гайкою. У пази диска

встановлені РЛ, які кріпляться сегментами.

На виступах диска, цапфи і РЛ виконані гребінці, які спільно з ущільненнями сполучених деталей, забезпечують мінімальні витіки газу. Схема ТВТ з постійним внутрішнім діаметром, що дозволяє отримати мінімальну кількість ступенів турбіни (в даному випадку 1 ступінь ТВТ) і найменшу довжину лопаток ступенів.

ТНТ – осьова, складається з соплового апарату, ротора ТНТ і опорного вінця.

Сопловий апарат ТНТ складається з:

- корпусу;
- блоків лопаток;
- діафрагми;
- кільця.

Діафрагма і кільце утворюють направляючий апарат для підведення охолоджуючого повітря до робочих лопаток ТНТ. Блоки лопаток - охолоджувані. Система охолодження профільної частини блоків лопаток формується вихровою матрицею. Охолоджуюче повітря до блоків лопаток підводиться зверху. Частина охолоджуючого повітря проходить через лопатки і надходить в НА для підведення до РЛ ТНТ.

На блоках лопаток, діафрагмі і кільці в місцях над гребінцями ротора встановлені сотові ущільнення, що забезпечують мінімальні перетікання газу.

Ротор ТНТ складається з диска, з'єднаного з валом штифтами. У пази диска встановлюються РЛ, які кріпляться сегментами. На виступах диска, вала і РЛ виконані гребінці, які забезпечують мінімальні перетікання газу.

Камера згоряння (КЗ) призначена для згоряння газоповітряної суміші з метою отримання відповідної маси робочого тіла з відповідною температурою у вигляді продуктів згоряння.

За конструкцією КЗ протиточна, трубчасто-кільцевого типу. КЗ складається з шістнадцяти жарових труб, розташованих паралельно осі двигуна в кільцевому просторі між кожухом КЗ і кожухом, двох запалювачів,

шістнадцяти двохканальних пальників, які кріпляться через прокладку за допомогою гвинтів до корпусу КВТ; колектора першого каналу, колектора другого каналу, які закріплені на шарнірних підвісках до вертикального роз'єму КВТ, шістнадцяти трубок підвідних першого каналу, шістнадцяти трубок підвідних другого каналу.

Паливні колектори першого і другого каналів складаються з двох половин кожен, що з'єднуються фланцями за допомогою скоб, що мають спеціальний клиновидний паз. Скоби стягуються гвинтами і стопоряться за допомогою шайб-замків. Між фланцями половин колекторів встановлюються прокладки.

На кожному з колекторів є по одному фланцю підведення газу і по шістнадцять штуцерів, до яких кріпляться підвідні трубки, якими газ підводиться до каналів пальникового пристрою.

Розпал палива в КЗ при запуску проводиться від двох запалювачів. Кожен запалювач забезпечує займання паливо-повітряної суміші в двох жарових трубах. Перекидання полум'я від однієї жарової труби до іншої здійснюється через полуменевоперекидаючі втулки жарових труб.

Кожна жарова труба своєю хвостовою частиною (обоймою) телескопічно входить в проточки соплового апарату ТВТ.

У головній частині кожна жарова труба двома фіксаторами кріпиться до вертикального фланця силового корпусу КВТ і спирається на посадочну поверхню пальникового пристрою. Така схема кріплення жарової труби забезпечує незмінне взаємне положення торця пальникового пристрою і жарової труби.

Температурне подовження жарової труби компенсується телескопічним з'єднанням обойми жарової труби і корпусу соплового апарату ТВТ.

СТ осьового типу, чотирьохступенева, призначена для приводу вала споживача потужності.

СТ складається з соплових апаратів, ротора і опорного вінця.

Соплові апарати другого, третього і четвертого ступеня об'єднані в корпусі соплового апарату.

Ротор СТ складається з валу, до якого кріпляться попарно диски першого і другого ступеня та третього і четвертого ступеня. В пази дисків вставлені РЛ.

Ротор СТ консольного типу, опорами якого слугують роликові підшипники. На кінці ротора встановлена пружна муфта, яка призначена для передачі крутного моменту від вала СТ валу споживача потужності, а також для компенсації зломів та неспівовісності валів.

Опорний вінець СТ складається з корпусу опорного вінця, дев'яти стійок, внутрішнього кожуха, корпусу підшипників, в якому розташовані опори ротора СТ: два роликових підшипника та один упорний підшипник ковзання.

1.3.2. Аналіз конструкції та принципу роботи підігрівача паливного газу ПГ-30

Для ГПА-25МН80.02 використовується підігрівач газу з проміжним теплоносієм виробництва фірми «Факел» – ПГ-30 [8].

Підігрівач призначений для непрямого підігріву природного, попутного, нафтового газу перед редукуванням в системах регулювання нового покоління автоматизованих ГРС з метою зниження невиробничих витрат природного газу на власні потреби при його експлуатації на автоматизованих ГРС і підвищення надійності роботи технологічного обладнання автоматизованих ГРС і газових мереж, призначених для споживання природного газу.

Підігрівач здійснює непрямий підігрів газу через проміжний теплоносій, а також автоматичне підтримання заданої температури газу на виході з підігрівача.

Проміжний теплоносій підігрівається за допомогою блоку пальників, розпал якого здійснюється за допомогою запального пальника.

Температура навколишнього середовища не нижче мінус 30°C, а температура газу на вході в підігрівач не нижче мінус 15°C.

В якості проміжного теплоносія слід використовувати водні розчини діетиленгліколя або теплоносія з температурою початку кристалізації не нижче

мінус 30°C.

Основні технічні характеристики підігрівача ПГ-30 наведено в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Технічні характеристики ПГ-30

Найменування показника	Величина
Тиск газу, що підігрівається на вході в підігрівач, МПа, не більше	7,35
Температура газу на вході в підігрівач, °С, не нижче	мінус 15
Номинальна продуктивність за газом, нм ³ /год, не менше	30 000
Мінімальна продуктивність за газом, нм ³ /год, не менше	3000
Максимальна продуктивність за газом, нм ³ /год, не більше	33 000
Максимальна температура газу на виході з підігрівача, °С, не вище	70
Перепад температур газу на вході і на виході з підігрівача при номінальній продуктивності °С, не менше	35
Точність підтримання температури газу на виході з підігрівача, °С, в межах	±2
Витрата газу на блок пальників при максимальній продуктивності, нм ³ /год, не більше	70
Тиск паливного газу для блоку пальників на вході газорегуляторного блоку підігрівача, МПа, не більше	1,2
Номинальний тиск газу перед блоком пальників, кПа, не більше	73,5
Коефіцієнт корисної дії (ККД) підігрівача, %, не менше	92
Розрідження на виході камери горіння підігрівача, Па, не менше	5
Номинальна споживана електрична потужність, Вт, не більше	150
Температура поверхонь підігрівача, доступних при обслуговуванні, °С, не вище	35

Конструктивно підігрівач представляє собою корпус 1, в який вмонтовані теплообмінник 3, теплогенератор 2.

Корпус 1 заповнюється у споживача проміжним теплоносієм. Теплогенератор 2 і теплообмінник 3 занурені в проміжний теплоносій, рівень якого контролюється за рамкою покажчика рівня.

На корпусі 1 закріплена шафа блока керування і обліку газу в якому знаходяться щит керування комплексу «Керування ПГ» і блок газорегулюючий з «свічкою» 11, люк запобіжників для аварійного викиду газу у випадку

прориву газу із трубного пучка. Для видалення продуктів згорання з теплогенератора 2 встановлена труба вихідних газів 4. Для запобігання руйнування підігрівача при можливому вибуху газоповітряної суміші в камері горіння передбачений вибуховий клапан 9 відкидного типу.

Принцип роботи підігрівача полягає в наступному: газ з магістралі КС під тиском (0,3 – 1,2) МПа поступає в блок газорегулюючий, де його тиск знижується і підтримується на заданому рівні (близько 73,5 кПа) при подачі на блок пальників, що знаходиться в теплогенераторі 2, де відбувається його спалювання. Продукти згорання газу через теплогенератор 2 надходять в трубу вихідних газів 4, звідки видаляються в атмосферу.

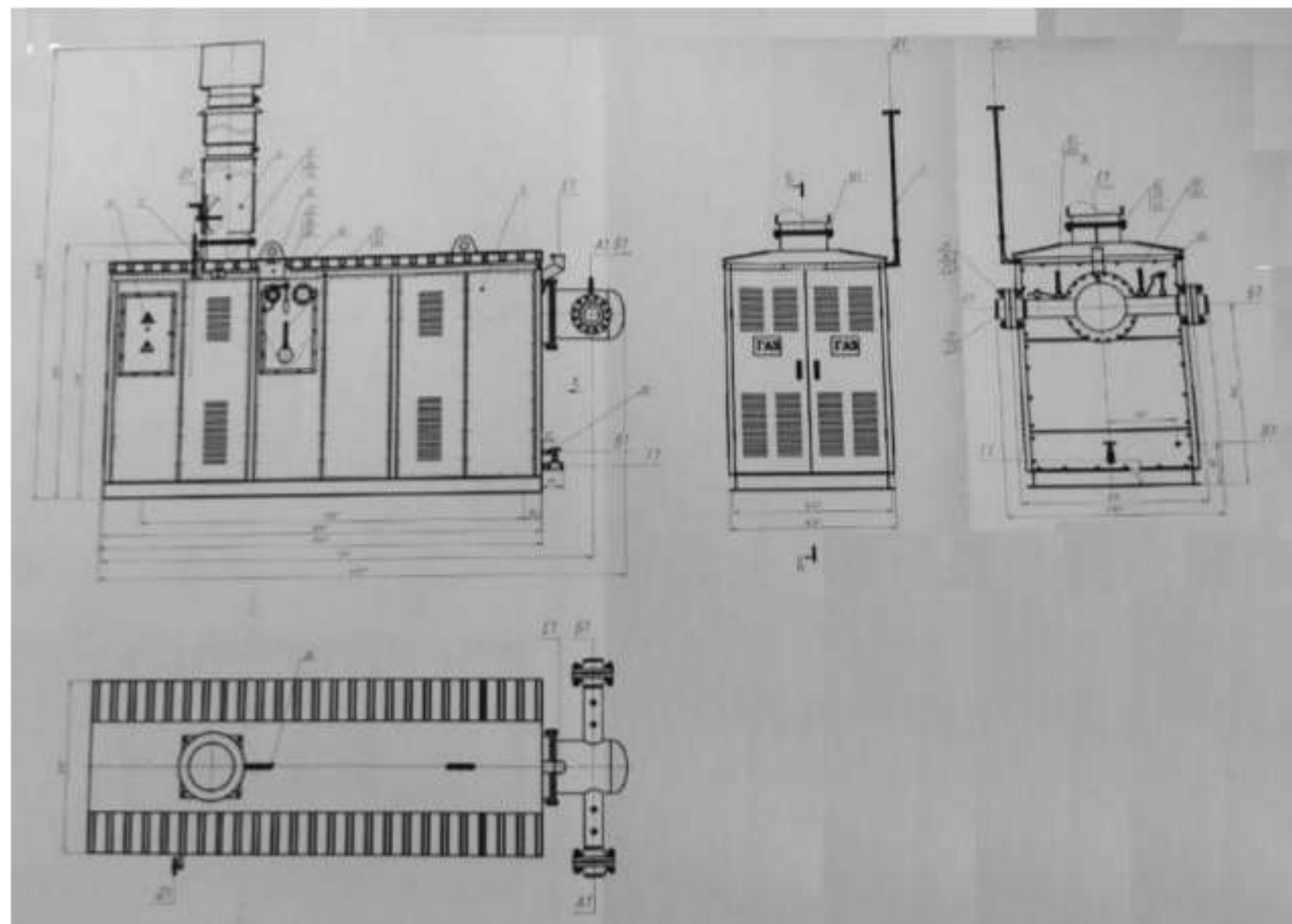


Рис. 1.5. Підігрівач паливного газу ПГ-30

Паливний або пусковий газ з магістралі тиском 7,35 МПа надходить в один з двох відсіків розділової камери теплообмінника 3, а потім в двоходовий трубний пучок.

Напрямок входу-виходу газу, що підігрівається – довільний, допускається як зліва на право, так і зправа на ліво. Для зміни напрямку досить змінити місцями термометри і переставити термопару на вихідний патрубок, а на вхідному патрубку гільзу заглушити пробкою.

1.3.3. Аналіз конструкції рекуперативного теплообмінника системи «газ-газ»

Теплообмінник системи «газ-газ» являє собою кожухотрубний двоходовий, горизонтальний, рекуперативний теплообмінник змішаного току, жорсткої конструкції. Внутрішня конструкція теплообмінника являє собою пучок зібраних гладких труб, зовнішнім діаметром 20 мм виготовлених зі сталі Ст 10, розміщених в шаховому порядку по вершинах рівносторонніх трикутників зі стороною 5 мм, що жорстко закріплені в трубних решітках, які вмонтовані в кожух-корпус внутрішнім діаметром 800 мм виготовлений з легованої сталі марки 09Г2С-15. Для продувки та зливу конденсату передбачено з кожного боку теплообмінника дренажний та продувочний крани. В якості теплоносія, що використовується для підігріву паливного газу слугує компримований природний газ, який надходить до теплообмінника та після охолодження там поступає в нагнітальний шлейф за АПО технологічного газу, при цьому підтримується постійна температура паливного газу [9].

Зовнішній вигляд теплообмінника зображено на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд теплообмінника

Таблиця 1.3

Технічні характеристики теплообмінника

Найменування показника	Трубний простір	Міжтрубний простір
Робочий тиск, не більше МПа	7,5	7,5
Розрахунковий тиск, МПа	7,5	7,5
Пробний тиск (гідравлічний), МПа	9,4+0,2	9,4+0,2
Температура робочого середовища на вході, °С	від -2 до +10	від 30 до 60
Температура робочого середовища на виході, °С	не менше +15	від 15 до 30
Розрахункова температура стінки, °С	100	100
Мінімальна допустима температура стінки апарата, що знаходиться під тиском, °С	-30	-30
Об'єм, м ³	0,86	1,16
Кількість ходів	2	1

Висновки за розділом

У даному розділі наведено історичні відомості про Сумське ЛВУ МГ та технічні показники такі як: потужність ЛВУ, протяжність газопроводів, кількість автоматизованих ГРС, що обслуговуються. Дано коротку характеристику компресорного цеху КС-32 «П» Ромненської ГКС та газопроводу «Прогрес», а саме визначено номінальну продуктивність, тип встановлених ГПА на КС, комерційну продуктивність газопроводу, напрямок руху та кількість КС, що задіяні в транспорті газу з родовищ Ямалу до Західної Європи. Наведено маршрут проходження газопроводу.

Розглянуто основне технологічне обладнання задіяне в процесі компримування природного газу. Описано блок підготовки технологічного газу до якого входять пиловловлювачі та фільтр-сепаратори. Визначено основні технічні показники для обладнання блоку очистки і осушки технологічного газу. Розглянуто основні технічні показники для ГПА-25МН80.02. Приведено основні технічні дані для апарату повітряного охолодження компримованого газу 2АВГ-75.

Розглянуто основні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій на базі КС-32 «П» та визначено доцільність модернізації КС.

Наведено параметри роботи ГПА-25МН80.02 на номінальному режимі роботи. Розглянуто конструкцію двигуна ДН-80Л та системи забезпечення його нормальної роботи. Наведено опис конструкції та принципу роботи підігрівача паливного газу ПГ-30, визначено основні технічні показники. Розглянуто конструкцію та принцип роботи рекуперативного теплообмінника, що використовується для підігріву паливного газу. Наведено основні переваги даного теплообмінника перед підігрівачем ПГ-30.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГПА КС-32 «П»

м. РОМНИ

Дослідження ефективності роботи ГПА в процесі перекачки природного газу проводимо шляхом оцінки ефективності роботи його складових, а саме визначивши двигуна ДН-80Л та ВЦН ЦН 650-22-2. Ефективність роботи двигуна оцінюємо значенням його ККД. Розрахунок робочих параметрів двигуна, взявши за прототип ГТД ДН-80Л, було проведено мною у дипломній роботі здобувача освітнього ступеня бакалавр [2]. В ході проведення розрахунків було підтверджено ККД двигуна на рівні 35%, що відповідає дійсному значенню.

Ефективність роботи ВЦН ЦН 650-22-2 дослідимо визначивши адіабатичний та політропний ККД стиснення, а також показник політропи. Вихідними даними для розрахунку є добова відомість робочих параметрів ВЦН. На основі розрахунків проаналізуємо можливість використання роботи теплового опору та сил тертя для підігріву паливного газу в рекуперативному теплообміннику системи «газ-газ».

2.1. Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу

Виконуючи розрахунки фізико-хімічних властивостей природного газу оперують термінами «стандартні», «нормальні» та «робочі умови» [10].

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

Нормальні умови – умови, за яких температура природного газу $T_{норм} = 273$, а тиск $p_{норм} = 101325$ Па.

Під терміном «робочі умови» розуміють значення температури і тиску природного газу в реальних умовах експлуатації.

Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу проводимо відповідно до рекомендацій [10] для компонентного складу газу, що транспортується газопроводом «Прогрес» (табл. 2.1.).

Таблиця 2.1

Компонентний склад газу

Компонент	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	O ₂	N ₂	CO ₂
Об'ємна частка, %	95,321	2,668	0,831	0,254	0,041	0,017	0,0035	0,632	0,232

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 :

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

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 :

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

Визначаємо питому ізобарну C_p та ізохорну C_v теплоємність 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):

$$C_p = \frac{2165,7 \cdot 95,321 + 1647,2 \cdot 2,668 + 1549,6 \cdot 0,831 + 1591,9 \cdot 0,254 + 1593,2 \cdot 0,041}{100\%} +$$

$$+ \frac{1602,4 \cdot 0,017 + 914,9 \cdot 0,0035 + 1039,2 \cdot 0,632 + 814,8 \cdot 0,232}{100\%} = 2135 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

$$C_v = \frac{1648 \cdot 95,321 + 1370,4 \cdot 2,668 + 1361,6 \cdot 0,831 + 1451,2 \cdot 0,254 + 1479,3 \cdot 0,041}{100\%} +$$

$$+ \frac{1507,3 \cdot 0,017 + 626,4 \cdot 0,0035 + 741,1 \cdot 0,632 + 626,4 \cdot 0,232}{100\%} = 1629 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

Відношення питомої ізобарної теплоємності природного газу C_p до питомої ізохорної C_v теплоємності називають коефіцієнтом адиабати k :

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2135}{1629} = 1,31.$$

Визначаємо густину газу заданого компонентного складу за нормальних умов використовуючи формулу:

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

де ρ_n - густина газу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$,

μ_r - молярна маса газу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{кмоль}$,

V_m - молярний об'єм газу за нормальних умов, $V_m = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

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

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

Підставивши формулу (2.4) до формули (2.3) визначимо ρ_H :

$$\rho_H = \frac{16 \cdot 95,321 + 30 \cdot 2,668 + 44 \cdot 0,831 + 58 \cdot 0,254 + 72 \cdot 0,041 + 86 \cdot 0,017}{22,4 \cdot 100\%} + \frac{32 \cdot 0,0035 + 28 \cdot 0,632 + 44 \cdot 0,232}{22,4 \cdot 100\%} = 0,754 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right)$$

Густина газу за стандартних умов визначається як:

$$\rho_{ст} = \rho_H \cdot \frac{T_H}{T_{ст}} = 0,754 \cdot \frac{273}{293} = 0,703 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right)$$

Визначимо відносну густину природного газу щодо повітря при стандартних умовах:

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

де $\rho_{пов} = 1,2047 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за стандартних умов [10].

Газова стала R_r визначається сумою добутку газової сталої кожного компоненту газу R_i на частку відповідного компонента в газі r_i :

$$R_r = \sum_{i=1}^n R_i \cdot r_i =$$

$$= \frac{519,4 \cdot 95,321 + 276,5 \cdot 2,668 + 188,6 \cdot 0,831 + 146,7 \cdot 0,254 + 115,3 \cdot 0,041}{100\%} +$$

$$+ \frac{96,5 \cdot 0,017 + 259,7 \cdot 0,0035 + 296,9 \cdot 0,632 + 189 \cdot 0,232}{100\%} = 506,8 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

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

Таблиця 2.2

Фізико-хімічні властивості природного газу

Показник	Розмірність	Величина
C_p	Дж/кг·К	2135
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	506,8

З використанням програмного середовища MathCAD розробляємо програму розрахунку фізико-хімічних властивостей природного газу заданого компонентного складу (додаток А).

2.2. Розрахунок показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 650-22-2 КС-32 «П»

Процес стиснення газу в нагнітачі відбувається при наявності тертя і теплообміну тому не підпорядковується рівнянню адіабати. На окремих ділянках тракту нагнітача зміну стану газу можна достатньо точно описати рівнянням політропи. При цьому в різних елементах нагнітача процес стиснення газу в різній степені відхиляється від адіабатичного, тобто проходить з різним показником політропи. Однак для дослідження процесу в нагнітачі в цілому користуються деяким 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 в початковому та кінцевому станах [12].

Розглянемо процес стиснення природного газу у решітці ротора ВЦН ЦН 650-22-2, що встановлений на КС-32 «П».

Дійсні середньодобові параметри роботи нагнітача:

- температура всмоктування газу – $T_{bc} = 22\text{ }^{\circ}\text{C} = 295\text{ K}$;
- температура нагнітання газу – $T_n = 47\text{ }^{\circ}\text{C} = 320\text{ K}$;
- абсолютний тиск всмоктування газу – $p_{bc} = 53,5\text{ атм} = 5,247\text{ МПа}$;
- абсолютний тиск нагнітання газу – $p_n = 70,4\text{ атм} = 6,904\text{ МПа}$.

Для визначення показника політропи графічно зобразимо баланс роботи відцентрового нагнітача в T-S координатах. Побудуємо залежність ентропії від температури, для цього розрахуємо значення ентропії для діапазону температури $T = 273 \dots 321\text{ K}$ при постійному тиску всмоктування та нагнітання $S = f(T)_{p_{bc}=\text{const}}$, $S = f(T)_{p_n=\text{const}}$ за формулами [12]:

$$S_{bc} = C_v \cdot \ln \frac{T^k}{p_{bc}^{k-1}}; \quad (2.5)$$

$$S_n = C_v \cdot \ln \frac{T^k}{p_n^{k-1}}. \quad (2.6)$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

**Результати розрахунку ентропії при постійних значеннях тиску
всмоктування та нагнітання**

T, К	$S_{вс},$ Дж/кг·К	$S_{н},$ Дж/кг·К
273	4158	4019
275	4173	4034
277	4189	4050
279	4204	4065
281	4219	4080
283	4234	4096
285	4249	4111
287	4264	4126
289	4279	4140
291	4294	4155
293	4308	4170
295	4323	4184
297	4337	4199
299	4352	4213
301	4366	4227
303	4380	4241
305	4394	4255
307	4408	4269
309	4422	4283
311	4436	4297
313	4449	4311
315	4463	4324
317	4476	4338
319	4490	4351
320	4497	4358
321	4503	4365

За результатами розрахунків графічно зображуємо процес стиснення газу у відцентровому нагнітачі (рис. 2.1).

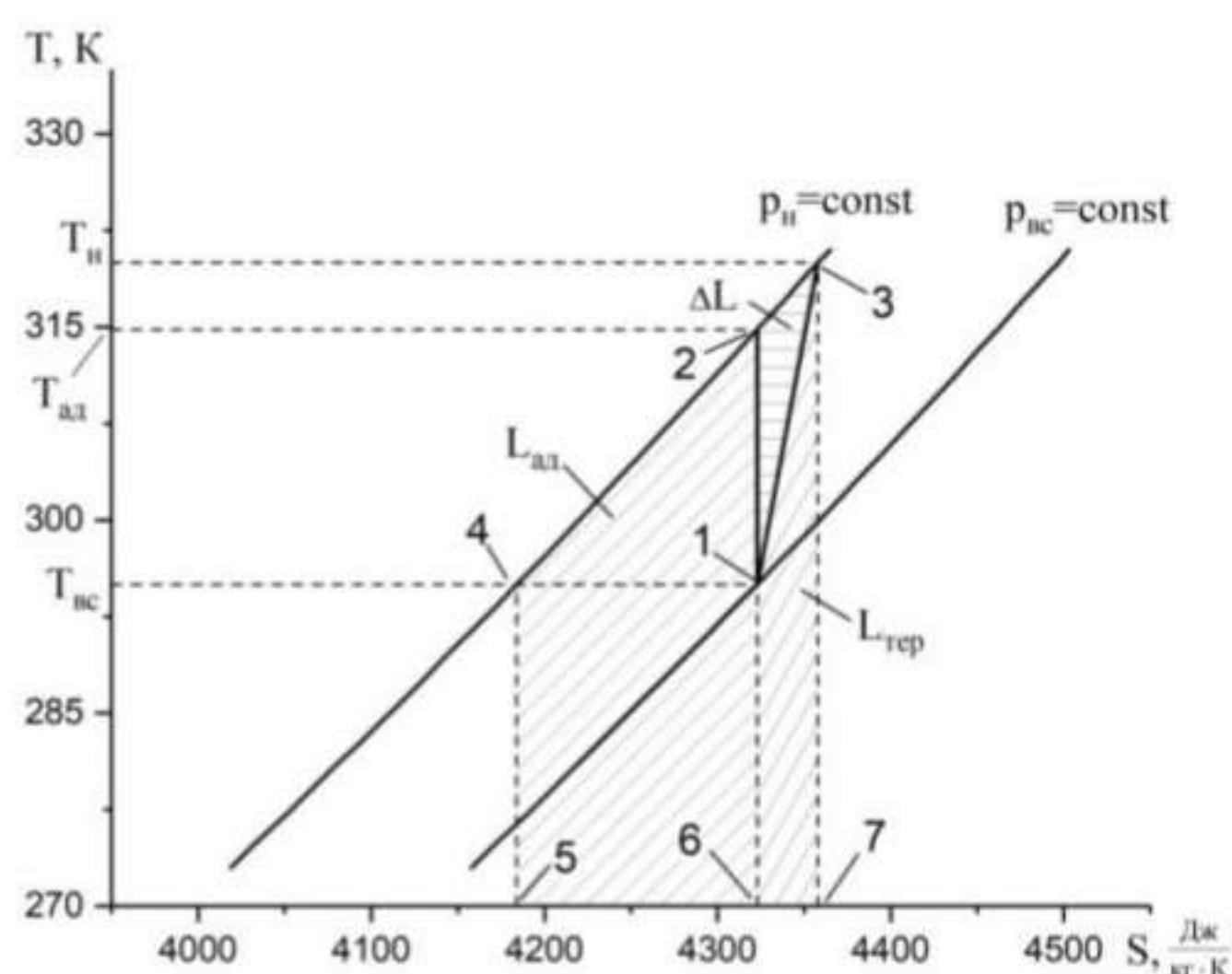


Рис. 2.1. Баланс роботи відцентрового нагнітача типу ЦН 650-22-2

Точка 1 відповідає параметрам газу на вході в нагнітач, а саме температурі всмоктування $T_{вс}$ і ентропії визначеній за температури та тиску всмоктування. Лінією 1-2 зображується ідеальний (адіабатичний) процес стиснення газу в нагнітачі, реальний (політропний) процес стиснення відповідає прямій 1-3. Точка 2 відповідає параметрам газу за ізоентропійного стиснення і визначає температуру адіабатичного нагнітання $T_{н.ад}$. Точка 3 характеризує стан газу на виході з нагнітача і визначається температурою нагнітання та ентропією визначеною за температури та тиску нагнітання [12].

Як видно з T-S діаграми питома адіабатична робота стиснення $L_{ад}$ визначиться як площа фігури 5-4-2-6, питома робота теплового опору ΔL еквівалентна площі фігури 1-2-3, питома робота сил тертя $L_{тер}$ рівна площі фігури 1-6-7-3, питома політропна робота стиснення визначиться, як сума питомих адіабатичної роботи $L_{ад}$ та роботи теплового опору ΔL . Визначені роботи еквівалентні площам фігур вираженим в теплових одиницях.

Для подальших розрахунків визначимо адіабатичну температуру нагнітання $T_{н.ад}$ за формулою:

$$T_{н.ад} = \left(e^{\frac{S_{всT_{вс}}}{C_v}} \cdot (p_{н})^{k-1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left(e^{\frac{4323}{1629}} \cdot (6,904 \cdot 10^6)^{1,31-1} \right)^{\frac{1}{1,31}} = 314,8 \text{ (К)}, \quad (2.7)$$

де $S_{всT_{вс}}$ – значення ентропії газу за тиску та температури всмоктування,

Дж/кг·К.

Розіб'ємо утворену фігуру на прості елементи для зручності обчислень і зобразимо на рис. 2.2.

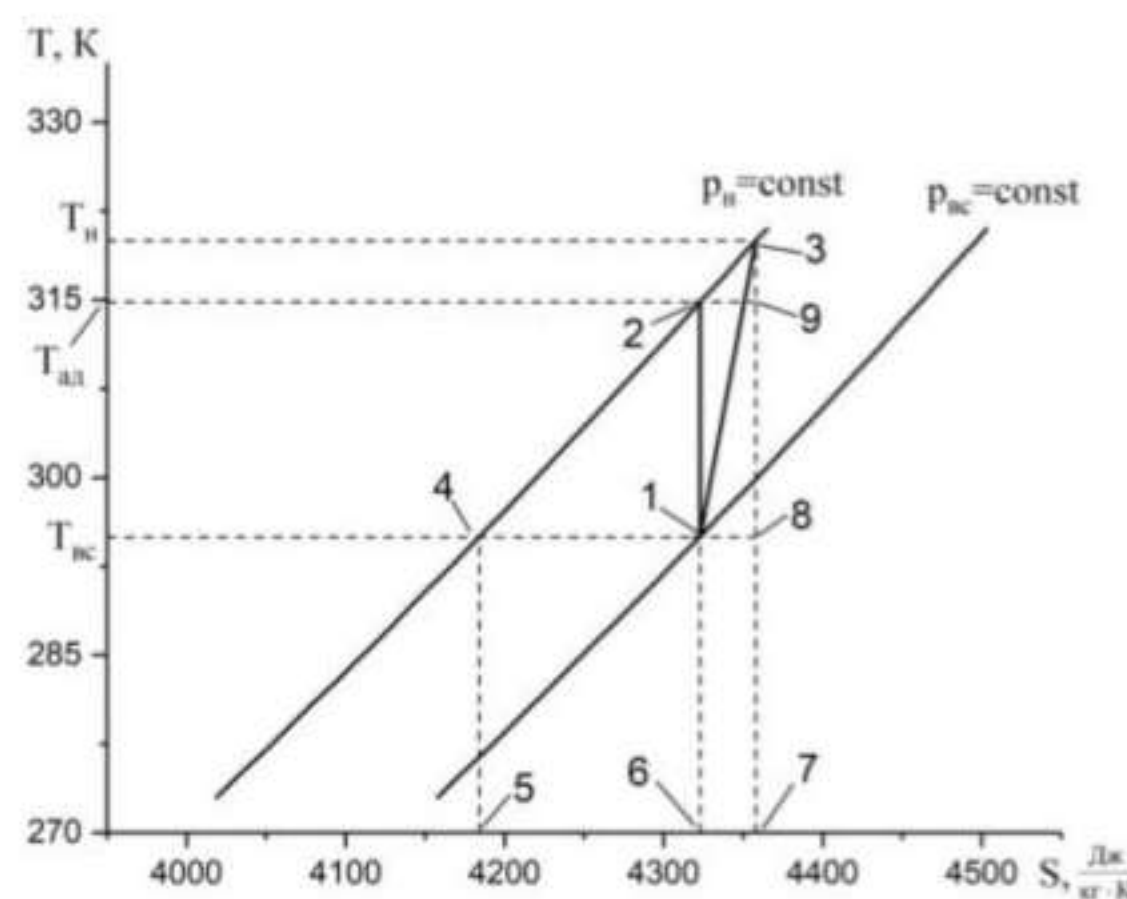


Рис. 2.2. Схема розбиття утвореної площі на прості елементи

Визначимо площі відповідних елементів. Площу елемента 1-4-5-6 позначимо F_1 і визначимо, як площу прямокутника:

$$F_1 = (S_{всT_{вс}} - S_{нT_{вс}}) \cdot T_{вс}, \quad (2.8)$$

де $S_{нT_{вс}}$ – значення ентропії газу за тиску нагнітання та температури

всмоктування, Дж/кг·К.

Площа елемента 1-2-4 позначимо F_2 і визначимо, як площу прямокутного трикутника:

$$F_2 = \frac{1}{2}(S_{\text{всТ}_{\text{вс}}} - S_{\text{нТ}_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\text{н.ад}} - T_{\text{вс}}). \quad (2.9)$$

Площу елемента 1-2-9-8 позначимо F_3 і обчислимо, як площу прямокутника:

$$F_3 = (S_{\text{нТ}_{\text{н}}} - S_{\text{всТ}_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\text{н.ад}} - T_{\text{вс}}). \quad (2.10)$$

Площу елемента 2-9-3 позначуємо F_4 і виражаємо, як площу прямокутного трикутника:

$$F_4 = \frac{1}{2}(S_{\text{нТ}_{\text{н}}} - S_{\text{всТ}_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{н.ад}}). \quad (2.11)$$

Площу елемента 1-3-8 позначуємо F_5 і обраховуємо, як площу прямокутного трикутника:

$$F_5 = \frac{1}{2}(S_{\text{нТ}_{\text{н}}} - S_{\text{всТ}_{\text{вс}}}) \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{вс}}). \quad (2.12)$$

Площу елемента 1-6-7-8 позначуємо F_6 і визначаємо, як площу прямокутника:

$$F_6 = (S_{\text{нТ}_{\text{н}}} - S_{\text{всТ}_{\text{вс}}}) \cdot T_{\text{вс}} \quad (2.13)$$

Результати розрахунків за формулами (2.8) – (2.13) заносимо до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Значення визначених площ виражене в теплових одиницях

$F_1, \text{Дж/кг}$	$F_2, \text{Дж/кг}$	$F_3, \text{Дж/кг}$	$F_4, \text{Дж/кг}$	$F_5, \text{Дж/кг}$	$F_6, \text{Дж/кг}$
40911	1373	692,4	90,9	437,1	10315

Значення питомої адіабатичної роботи стиснення $L_{ад}$ знайдемо, як суму знайдених площ F_1 і F_2 :

$$L_{ад} = F_1 + F_2. \quad (2.14)$$

Питому роботу теплового опору визначаємо через відповідні площі елементів:

$$\Delta L = F_3 + F_4 - F_5. \quad (2.15)$$

Визначаємо питому політропну роботу стиснення:

$$L_{пол} = L_{ад} + \Delta L. \quad (2.16)$$

Питому роботу сил тертя визначимо, як суму площ F_5 і F_6 :

$$L_{тер} = F_5 + F_6. \quad (2.17)$$

Питома ефективна робота нагнітача:

$$L_{еф} = L_{ад} + \Delta L + L_{тер}. \quad (2.18)$$

Результати розрахунків за формулами (2.14) – (2.18) заносимо до табл. 2.5.

**Результати розрахунків значень питомих
робіт характерних процесу стиснення**

$L_{ад}, \text{Дж/кг}$	$\Delta L, \text{Дж/кг}$	$L_{пол}, \text{Дж/кг}$	$L_{тер}, \text{Дж/кг}$	$L_{еф}, \text{Дж/кг}$
42284	346,2	42630	10752	53382

Знайдемо значення політропного та адіабатичного ККД нагнітача:

$$\eta_{пол} = \frac{L_{пол}}{L_{еф}} \cdot 100\% = \frac{42630,2}{53380} \cdot 100\% = 79,9\%; \quad (2.19)$$

$$\eta_{ад} = \frac{L_{ад}}{L_{еф}} \cdot 100\% = \frac{42284}{53380} \cdot 100\% = 79,2\%. \quad (2.20)$$

Визначимо показник політропи відповідно до [12]:

$$n = \frac{L_{пол}}{L_{пол} - R_{г}(T_{н} - T_{вс})} = \frac{42630,2}{42630,2 - 506,8 \cdot (320 - 295)} = 1,423. \quad (2.21)$$

Проаналізувавши отримані значення політропного та адіабатного ККД можна зробити висновок, що робота нагнітача на даному режимі є досить ефективною. Різниця адіабатичного та політропного ККД незначна.

З використанням програмного середовища MathCAD розробляємо програму розрахунку адіабатичного, політропного ККД та показника політропи для середньодобових значень параметрів роботи нагнітача (додаток Б).

2.3. Розрахунок добових значень показника політропи відцентрового нагнітача ЦН 650-22-2 КС-32 «П»

Добові значення показника політропи розраховуємо для компонентного складу газу з фізико-хімічними властивостями визначеними раніше. Значення добових параметрів роботи відцентрового нагнітача типу ЦН 650-22-2 беремо з добової відомості ГПА-25МН80.02. і заносимо до табл. 2.6.

Добові значення параметрів роботи нагнітача

Час, год	T_{bc} , К	T_n , К	p_{bc} , МПа	p_n , МПа
1	292	316	5,48	6,95
2	292	316	5,48	6,97
3	292	316	5,48	6,97
4	292	316	5,49	6,98
5	292	316	5,49	6,99
6	292	316	5,49	6,99
7	292	316	5,49	6,99
8	292	316	5,50	6,99
9	292	316	5,53	7,02
10	292	316	5,53	7,04
11	292	316	5,51	7,02
12	292	316	5,49	7,00
13	292	316	5,47	6,98
14	292	316	5,45	6,95
15	292	316	5,44	6,93
16	292	316	5,42	6,91
17	292	316	5,41	6,90
18	292	316	5,40	6,89
19	292	316	5,39	6,88
20	292	316	5,39	6,87
21	292	316	5,38	6,86
22	292	316	5,38	6,86
23	292	316	5,41	6,88
24	292	316	5,43	6,90

Аналогічно розрахунку показника політропи наведеному вище розраховуємо значення ентропії в характерних точках процесу стиснення необхідних для визначення добових значень показника політропи. Значення ентропії розрахуємо за формулами (2.5) – (2.6). В цьому випадку вони набудуть вигляду:

$$S_1 = C_v \cdot \ln \frac{T_{bc}^k}{p_{bc}^{k-1}};$$

$$S_2 = C_v \cdot \ln \frac{T_{bc}^k}{p_n^{k-1}};$$

$$S_3 = C_v \cdot \ln \frac{T_H^k}{P_H^{k-1}}.$$

Результати розрахунку заносимо до табл. 2.7.

Адіабатичну температуру нагнітання визначимо за формулою (2.7). У даному випадку вона набуде вигляду:

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

Результати розрахунку заносимо до табл. 2.7.

За аналогією з розрахунком показника політропи наведеним вище визначимо площі відповідних елементів фігур. Для даного випадку формули (2.8) – (2.13) матимуть вигляд:

$$F_1 = (S_1 - S_2) \cdot T_{\text{вс}};$$

$$F_2 = \frac{1}{2} (S_1 - S_2) \cdot (T_{\text{н.ад}} - T_{\text{вс}});$$

$$F_3 = (S_3 - S_1) \cdot (T_{\text{н.ад}} - T_{\text{вс}});$$

$$F_4 = \frac{1}{2} (S_3 - S_1) \cdot (T_H - T_{\text{н.ад}});$$

$$F_5 = \frac{1}{2} (S_3 - S_1) \cdot (T_H - T_{\text{вс}});$$

$$F_6 = (S_3 - S_1) \cdot T_{\text{вс}}.$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Результати розрахунків значень ентропії та площ елементів

Час, год	S ₁	S ₂	S ₃	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	T _{над}
1	4279	4159	4328	35055	1014	15000	172,6	582,7	14180	308,9
2	4279	4158	4326	35479	1039	14562	162,5	565,3	13756	309,1
3	4279	4158	4326	35479	1039	14562	162,5	565,3	13756	309,1
4	4278	4157	4326	35422	1036	14621	163,8	567,7	13814	309,1
5	4278	4156	4325	35633	1048	14403	158,9	559	13603	309,2
6	4278	4156	4325	35633	1048	14403	158,9	559	13603	309,2
7	4278	4156	4325	35633	1048	14403	158,9	559	13603	309,2
8	4277	4156	4325	35365	1032	14681	165,2	570	13871	309
9	4275	4154	4323	35194	1022	14857	169,2	577,1	14042	309
10	4275	4153	4321	35614	1047	14423	159,3	559,8	13622	309,2
11	4276	4154	4323	35728	1054	14304	156,7	555,1	13507	309,2
12	4278	4155	4324	35844	1061	14184	154	550,3	13392	309,3
13	4280	4157	4326	35960	1068	14064	151,4	545,6	13275	309,3
14	4282	4159	4328	35865	1062	14162	153,5	549,5	13370	309,3
15	4283	4161	4329	35711	1053	14322	157,1	555,8	13525	309,2
16	4285	4162	4331	35828	1060	14201	154,4	551	13408	309,3
17	4286	4163	4331	35887	1063	14140	153	548,6	13349	309,3
18	4287	4163	4332	35946	1067	14079	151,7	546,2	13290	309,3
19	4288	4164	4333	36005	1070	14017	150,4	543,7	13231	309,4
20	4288	4165	4334	35790	1058	14240	155,2	552,5	13445	309,3
21	4288	4166	4334	35849	1061	14179	153,9	550,1	13386	309,3
22	4288	4166	4334	35849	1061	14179	153,9	550,1	13386	309,3
23	4286	4164	4333	35459	1038	14583	163	566,2	13777	309,1
24	4284	4163	4331	35342	1031	14704	165,7	571	13893	309

Розраховуємо значення робіт $L_{ад}$, ΔL , $L_{пол}$, $L_{тер}$ за формулами (2.14) – (2.18) та заносимо результати до 4Забл.. 2.8. Знаходимо погодинні значення політропного $\eta_{пол}$ та адіабатного $\eta_{ад}$ ККД за формулами (2.19) – (2.20). Розраховуємо значення показника політропи n за формулою (2.21).

Результати розрахунків заносимо до табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Добові значення адіабатичної і політропної роботи

$L_{ад}$, Дж/кг	ΔL , Дж/кг	$L_{пол}$, Дж/кг	$L_{тер}$, Дж/кг	$\eta_{ад}$, %	$\eta_{пол}$, %	n
36069	410,2	36480	14763	70,4	71,2	1,5
36518	402,9	36921	14322	71,3	72	1,491
36518	402,9	36921	14322	71,3	72	1,491
36457	403,9	36861	14381	71,2	71,9	1,493
36681	400,1	37081	14162	71,6	72,4	1,488
36681	400,1	37081	14162	71,6	72,4	1,488
36681	400,1	37081	14162	71,6	72,4	1,488
36397	404,9	36802	14441	71	71,8	1,494
36216	407,8	36624	14619	70,7	71,5	1,497
36661	400,5	37061	14182	71,5	72,3	1,489
36782	398,4	37181	14062	71,8	72,6	1,486
36905	396,3	37301	13942	72	72,8	1,484
37028	394,3	37422	13821	72,3	73	1,482
36927	395,9	37323	13920	72,1	72,8	1,483
36764	398,7	37163	14080	71,7	72,5	1,487
36888	396,6	37284	13959	72	72,8	1,484
36950	395,5	37346	13897	72,1	72,9	1,483
37013	394,5	37407	13836	72,2	73	1,482
37075	393,4	37469	13774	72,4	73,1	1,481
36848	397,3	37245	13998	71,9	72,7	1,485
36911	396,2	37307	13936	72	72,8	1,484
36911	396,2	37307	13936	72	72,8	1,484
36496	403,2	36900	14343	71,2	72	1,492
36373	405,2	36779	14464	71	71,8	1,494

На рис. 2.3 зображуємо погодинну зміну питомих адіабатної $L_{ад}$ та політропної $L_{пол}$ робіт стиснення в нагнітачу.

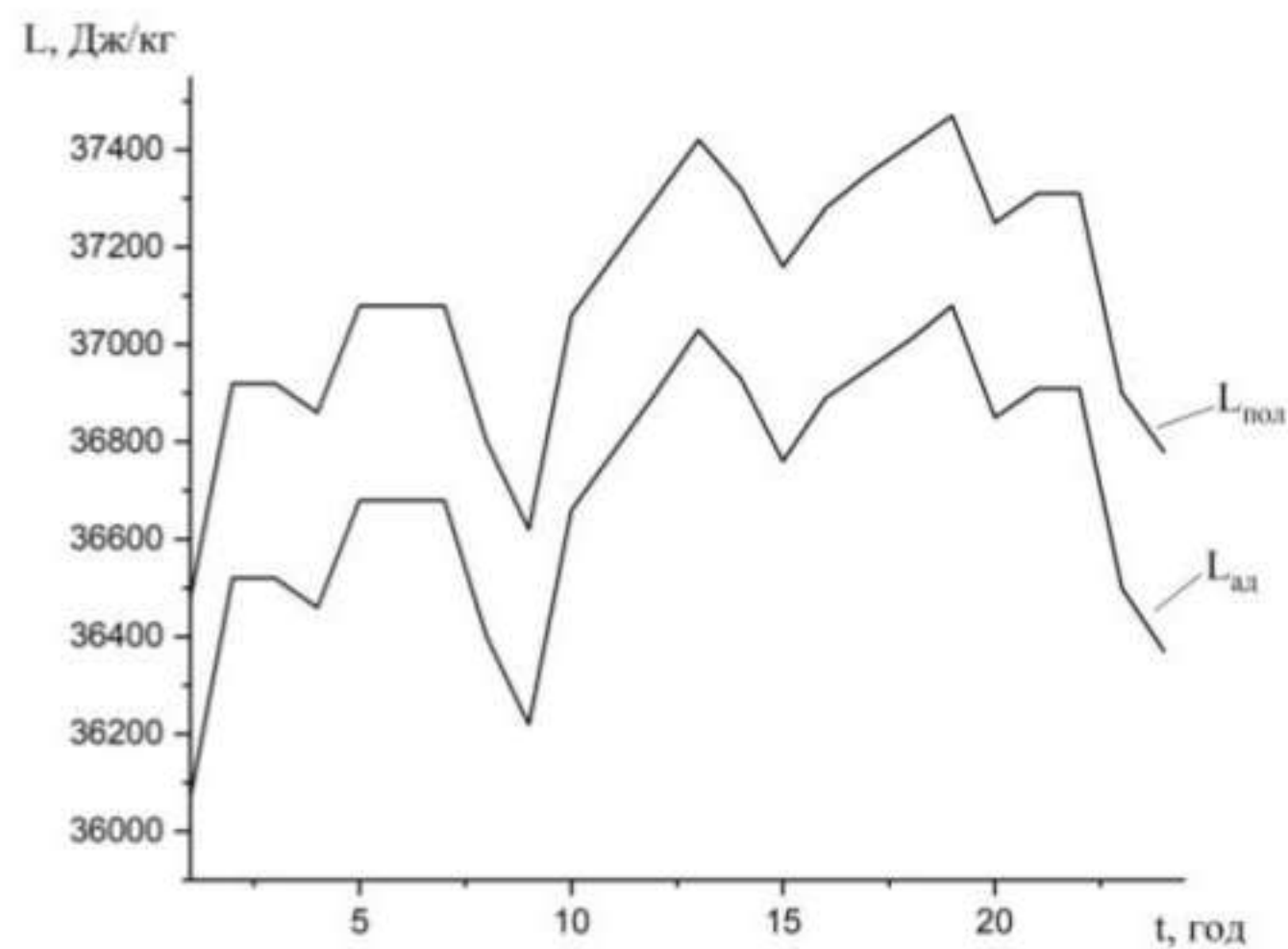


Рис. 2.3. Добова зміна політропної та адіабатичної роботи стиснення

На отриманому графіку можна побачити, як змінюється адіабатична та політропна робота стиснення на протязі доби. Різниця між політропною та адіабатичною роботою стиснення це величина роботи теплового опору ΔL - робота, що затрачується для подолання гідравлічних втрат, що призводить до підігріву компримованого газу. Зазвичай на КС зайве тепло відводиться за рахунок охолодження в АПО технологічного газу. Тому для зменшення неефективних витрат природного газу на власні потреби пропонується застосувати рекуперативний теплообмінник для підігріву паливного газу за рахунок використання роботи теплового опору та роботи сил тертя.

З використанням програмного середовища MathCAD розробляємо математичну модель розрахунку добових значень показника політропи залежно від режиму роботи ВЦН ЦН 650-22-2 (додаток В).

2.4. Тепловий розрахунок теплообмінника системи «газ-газ»

Для розрахунку коефіцієнта теплопередачі в якості вихідних даних використовуємо параметри роботи теплообмінника отримані з КС-32 «П». Розрахунок виконуємо відповідно до рекомендацій [13].

В якості «холодного» теплоносія використовується паливний газ, що надходить з абсолютним тиском $p_1=53,5$ бар і рухається всередині труб виготовлених зі сталі марки Ст 10, для якої коефіцієнт теплопровідності складає – $\lambda_{ст}=50$ Вт/м·К [13], діаметром $d_2/d_1=20/16$ мм []. Температура «холодного» газу на вході $t_1'=21^\circ\text{C}$, на виході $t_2''=37^\circ\text{C}$. Гарячий теплоносій, природний газ, який відбирається за нагнітачем, поступаючи в теплообмінник з абсолютним тиском $p_2=71$ бар, охолоджується з $t_2'=46^\circ\text{C}$ до $t_2''=40^\circ\text{C}$. Труби розміщені у трикутному порядку зі сторонами $S_1=S_2=S=5$ мм, внутрішній діаметр корпуса теплообмінника $d_3=800$ мм []. Витрата холодного теплоносія $G_1=10800$ кг/год=3 кг/с, а гарячого $G_2=29690$ кг/год=8,25 кг/с.

Визначаємо середні температури теплоносіїв t_1 і t_2 , як середньоарифметичні значення:

$$t_1 = \frac{1}{2}(t_1' + t_1'') = \frac{1}{2}(21 + 37) = 29 \text{ } (^\circ\text{C});$$

$$t_2 = \frac{1}{2}(t_2' + t_2'') = \frac{1}{2}(46 + 40) = 43 \text{ } (^\circ\text{C}).$$

Обчислюємо кількість теплоти, яка потрібна для підігріву:

$$Q_1 = G_1 C_p (t_1'' - t_1') = 3 \cdot 2135 \cdot (37 - 21) = 102,5 \text{ (кВт)}.$$

Знайдемо коефіцієнт стисливості паливного газу z_1 , використовуючи формулу Касперовича [10], для обчисленої середньої температури газу t_1 і тиску p_1 :

$$z_1 = 1 - 5,39 \cdot 10^5 \frac{p_1 \Delta_{ст}^{1,3}}{T_1^{3,3}} = 1 - 5,39 \cdot 10^5 \frac{53,5 \cdot 0,583^{1,3}}{302^{3,3}} = 0,906,$$

де T_1 – абсолютна середня температура паливного газу, К.

Обчислимо густину паливного газу, прийнявши тиск газу постійним за довжиною труби [10]:

$$\rho_1 = \rho_{ст} \frac{P_1 T_{ст}}{z_1 p_{ст} T_1} = 0,703 \cdot \frac{5,25 \cdot 10^6 \cdot 293}{0,906 \cdot 101325 \cdot 302} = 38,9 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$$

де P_1 – абсолютний тиск газу, Па.

Для першого теплоносія за $t_1=29^\circ\text{C}$ і тиску $p_1=53,5$ бар за довідником [15] знаходимо:

- коефіцієнт теплопровідності – $\lambda_1=0,039$ Вт/м·К;
- коефіцієнт динамічної в'язкості – $\mu_1=12,06 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- критерій Прандтля – $Pr_1=0,793$;
- густина газу – $\rho_1=38,9$ кг/м³.

У першому наближенні вважаємо температуру поверхонь труби:

$$t_{ст1} \approx t_{ст2} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2) = \frac{1}{2}(29 + 43) = 36 \text{ } (^\circ\text{C}),$$

де $t_{ст1}$ і $t_{ст2}$ – температура стінки труби відповідно з внутрішнього і зовнішнього боку.

Критерій Прандтля за цієї температури $Pr_{ст1}=0,785$ [15].

Знаходимо число Рейнольдса для першого теплоносія.

Для цього визначимо еквівалентний діаметр, за внутрішнім діаметром, для пучка паралельних труб, використовуючи формулу відповідно до рекомендацій [10]:

$$d_{екв} = (d_1^{2,6} n)^{\frac{1}{2,6}} = (0,016^{2,6} \cdot 323)^{\frac{1}{2,6}} = 0,148 \text{ (м)},$$

де $n=323$ – кількість трубок в пучку [9].

Визначаємо швидкість руху першого теплоносія крізь трубу еквівалентного діаметру:

$$w_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \frac{\pi d_{\text{еквл}}^2}{4}} = \frac{3}{38,9 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,148^2}{4}} = 4,503 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Знаходимо число Рейнольдса для першого теплоносія:

$$\text{Re}_1 = \frac{w_1 d_{\text{еквл}} \rho_1}{\mu_1} = \frac{4,503 \cdot 0,148 \cdot 38,9}{12,06 \cdot 10^{-6}} = 2,146 \cdot 10^6.$$

Число Нуссельта визначаємо для турбулентного режиму течії ($\text{Re}_1 > 1 \cdot 10^4$) за рівнянням:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_1 &= 0,021 \text{Re}_1^{0,80} \text{Pr}_1^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{стл}}} \right)^{0,25} \varepsilon_1 = \\ &= 0,021 \cdot \left(2,146 \cdot 10^6 \right)^{0,8} \cdot 0,738^{0,43} \cdot \left(\frac{0,738}{0,785} \right)^{0,25} \cdot 1 = 2215, \end{aligned}$$

де $\varepsilon_1 = 1$ – коефіцієнт який враховує змінення коефіцієнту тепловіддачі за довжиною труби [13].

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі від першого теплоносія до стінки труби:

$$\alpha_1 = \text{Nu}_1 \frac{\lambda_1}{d_{\text{еквл}}} = 2215 \cdot \frac{0,039}{0,148} = 589,8 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

Відповідно до рекомендацій [16] для теплообмінника з перехресним током теплоносіїв, у випадку руху однієї рідини назустріч іншій

зигзагоподібно, розрахунок може бути проведено, як для апарату з протиточною схемою руху теплоносіїв.

Тому критеріальне рівняння для газу, що охолоджується обираємо як для рідини, що рухається прямими трубами [13].

Знайдемо коефіцієнт стисливості газу, що охолоджується z_2 , використовуючи формулу Касперовича [10], для обчисленої середньої температури газу t_2 і тиску p_2 :

$$z_2 = 1 - 5,39 \cdot 10^5 \frac{p_2 \Delta_{ст}^{1,3}}{T_2^{3,3}} = 1 - 5,39 \cdot 10^5 \frac{71 \cdot 0,583^{1,3}}{316^{3,3}} = 0,893,$$

де T_2 – абсолютна середня температура газу.

Обчислимо густину газу, прийнявши тиск газу постійним за довжиною труби [10]:

$$\rho_2 = \rho_{ст} \frac{P_2 T_{ст}}{z_2 p_{ст} T_2} = 0,703 \cdot \frac{6,96 \cdot 10^6 \cdot 293}{0,893 \cdot 101325 \cdot 316} = 50,1 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$$

де P_2 – тиск газу виражений в Па.

Аналогічно для другого теплоносія за $t_2=43^\circ\text{C}$ і $p_2=71$ бар знаходимо за довідником [15]:

- коефіцієнт теплопровідності – $\lambda_2=0,043$ Вт/м·К;
- коефіцієнт динамічної в'язкості – $\mu_2=12,87 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- критерій Прандтля $Pr_2=0,802$;
- густина газу $\rho_2=50,1$ кг/м³;
- критерій Прандтля за температури стінки $Pr_{ст2}=0,812$.

Визначимо режим течії другого теплоносія.

Для цього визначаємо еквівалентний діаметр, за зовнішнім діаметром, для пучка паралельних труб, використовуючи формулу [10]:

$$d_{\text{екв2}} = (d_2^{2,6} n)^{\frac{1}{2,6}} = (0,02^{2,6} \cdot 323)^{\frac{1}{2,6}} = 0,185 \text{ (м)},$$

де $n=323$ – кількість трубок в пучку [9].

В даному випадку при визначенні числа Рейнольдса для потоку газу крізь пучок труб користуватимемось поняттям гідравлічний радіус.

Визначимо гідравлічний радіус відповідно до [10]:

$$R = \frac{S}{\chi}, \quad (2.22)$$

де S – площа живого січення потоку, м^2 ;

χ – змочувана поверхня, м.

Визначимо площу живого січення:

$$S = \frac{\pi}{4} (d_3^2 - 2 \cdot d_{\text{екв2}}^2) = \frac{\pi}{4} (0,8^2 - 2 \cdot 0,241^2) = 0,449 \text{ (м}^2\text{)},$$

де d_3 – діаметр корпусу теплообмінника.

Знайдемо змочувану поверхню:

$$\chi = \pi (d_3 + 2 \cdot d_{\text{екв2}}) = \pi (0,8 + 2 \cdot 0,185) = 3,671 \text{ (м)}.$$

Гідравлічний радіус рівний:

$$R = \frac{0,449}{3,671} = 0,122 \text{ (м)}.$$

Визначаємо швидкість руху другого теплоносія через січення з відповідним гідравлічним радіусом:

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \frac{\pi(4R)^2}{4}} = \frac{8,25}{50,1 \cdot \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 0,122)^2}{4}} = 0,876 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Число Рейнольдса для другого теплоносія:

$$Re_2 = \frac{w_2 \cdot 4 \cdot R \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{0,876 \cdot 4 \cdot 0,122 \cdot 50,1}{12,87 \cdot 10^{-6}} = 1,669 \cdot 10^6.$$

Режим течії турбулентний, число Нуссельта розраховуємо за формулою:

$$\begin{aligned} Nu_2 &= 0,021 \cdot Re_2^{0,80} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{ст2}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_2 = \\ &= 0,021 \cdot (1,669 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,802^{0,43} \cdot \left(\frac{0,802}{0,812} \right)^{0,25} \cdot 1,296 = 2345. \end{aligned}$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до другого теплоносія:

$$\alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{4R} = 2345 \cdot \frac{0,043}{4 \cdot 0,122} = 204,1.$$

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі за рівнянням для плоскої стінки, оскільки $d_2/d_1 < 2$:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{589,8} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{50} + \frac{1}{204,1}} = 150,7,$$

де $\delta = \frac{d_2 - d_1}{2} = 2 \cdot 10^{-3}$ (м) – товщина стінки.

Знаходимо середній температурний напір. Визначаємо значення середнього логарифмічного температурного напору $\Delta t_{\text{сер}}$, як для теплообмінника змішаного току теплоносіїв:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} \varepsilon_{\Delta t},$$

де $\Delta t_{\text{б}}$ - більший температурний напір між теплоносіями на вході і виході з теплообміннику, °С;

$\Delta t_{\text{м}}$ - менший температурний напір між теплоносіями на виході з теплообмінника, °С;

$\varepsilon_{\Delta t}$ - поправка, яка залежить від двох допоміжних величин Р і R.

$\Delta t_{\text{б}}$ і $\Delta t_{\text{м}}$ визначаємо як для рекуперативного апарату з протитечійним рухом теплоносіїв, відповідно:

$$\Delta t_{\text{б}} = t_2'' - t_1' = 40 - 21 = 19 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_2' - t_1'' = 46 - 37 = 9 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Для рекуперативного апарату змішаного току уточнюємо значення середнього температурного напору. Розраховуємо допоміжні величини P і R [13]:

$$P = \frac{t_1'' - t_1'}{t_2' - t_1'} = \frac{37 - 21}{46 - 21} = 0,64;$$

$$R = \frac{t_2' - t_2''}{t_1'' - t_1'} = \frac{46 - 40}{37 - 21} = 0,375.$$

Остаточно середній температурний напір визначаємо за формулою:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} \varepsilon_{\Delta t} = \frac{19 - 9}{\ln \frac{19}{9}} \cdot 0,92 = 12,3 \text{ (}^{\circ}\text{C)},$$

де $\varepsilon_{\Delta t} = 0,92$ – визначаємо за величинами P і R відповідно до [13].

Уточнюємо температури поверхонь труби:

$$t_{\text{ст1}}' = t_1 + \frac{k\Delta t_{\text{сеп}}}{\alpha_1} = 29 + \frac{150,7 \cdot 12,3}{589,8} = 32,15 \text{ (}^{\circ}\text{C)};$$

$$t_{\text{ст2}}' = t_2 - \frac{k\Delta t_{\text{сеп}}}{\alpha_2} = 43 - \frac{150,7 \cdot 12,3}{204,1} = 33,91 \text{ (}^{\circ}\text{C)};$$

$$t_{\text{ст}}^{\text{сеп}} = \frac{1}{2}(t_{\text{ст1}}' + t_{\text{ст2}}') = \frac{1}{2}(32,15 + 33,91) = 33,03 \text{ (}^{\circ}\text{C)}.$$

Отримані значення відрізняються від прийнятих раніше більше, ніж на 5%. Тому повторюємо розрахунок.

За уточненими значеннями температур стінок труби числа Прандтля $Pr_{\text{ст1}}' = 0,789$, $Pr_{\text{ст2}}' = 0,817$.

Визначаємо числа Нуссельта $Nu_{p,d1}' = 2212$, $Nu_{p,d2}' = 2342$.

Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_1' = 589$, $\alpha_2' = 203,8$.

Розраховуємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1'} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2'}} = \frac{1}{\frac{1}{589} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{50} + \frac{1}{203,8}} = 150,5.$$

Уточнюємо значення температури поверхонь труби:

$$t_{ст1}'' = t_1 + \frac{k' \cdot \Delta t_{сеп}}{\alpha_1'} = 29 + \frac{150,5 \cdot 12,3}{589} = 32,15 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$t_{ст2}'' = t_2 - \frac{k' \cdot \Delta t_{сеп}}{\alpha_2'} = 43 - \frac{150,5 \cdot 12,3}{203,8} = 33,91 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$t_{ст}^{сеп}'' = \frac{1}{2} (t_{ст1}'' + t_{ст2}'') = \frac{1}{2} (32,15 + 33,91) = 33 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Отримані значення температур відповідають прийнятним, отже зупиняємо розрахунок і приймаємо розрахунковий коефіцієнт теплопередачі рівним $k' = 150,5$.

Знайдемо значення реального коефіцієнта теплопередачі з рівняння теплопередачі [13]:

$$k_p = \frac{G_1 \cdot C_p \cdot (t_1'' - t_1')}{\Delta t \cdot F} = \frac{3 \cdot 2135 \cdot (37 - 21)}{12,3 \cdot 126} = 66.$$

Знайдемо коефіцієнт технічного стану для теплообмінника [13]:

$$k_{\text{тс}} = \frac{k_p}{k'} = \frac{66}{150,5} = 0,44.$$

Використовуючи рівняння теплового балансу визначаємо температуру паливного газу на виході з теплообмінника та будуємо графік залежності температури паливного газу на виході з теплообмінника від масової витрати паливного газу.

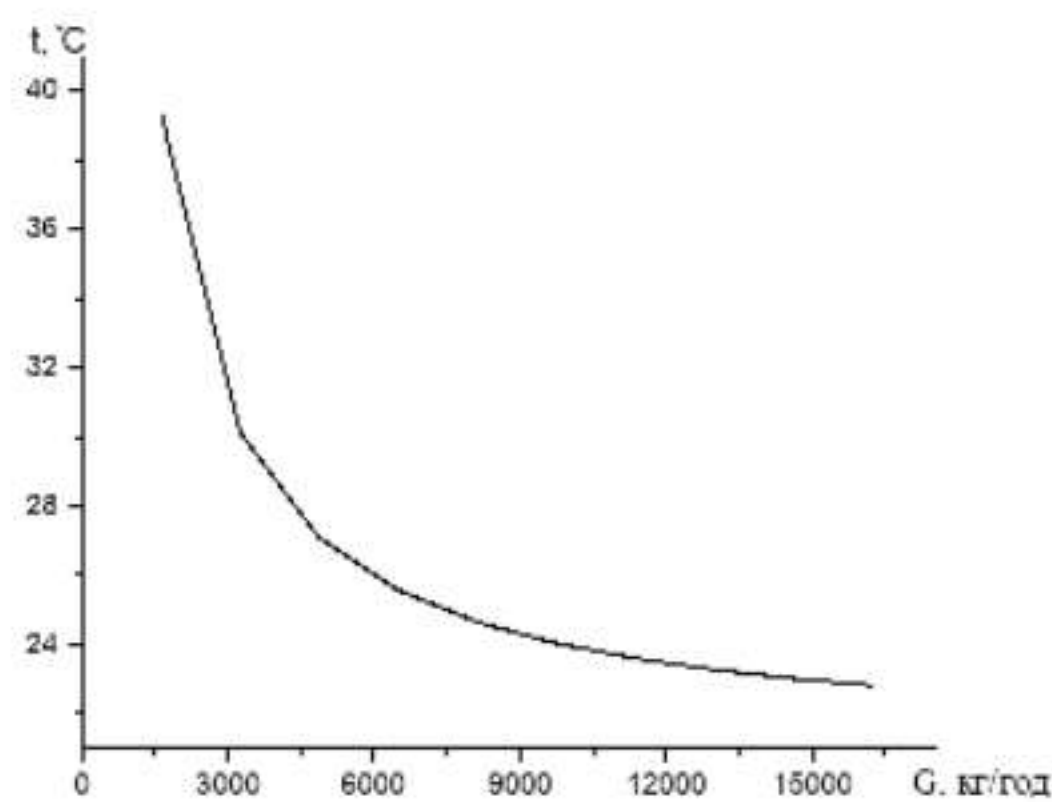


Рис. 2.4. Залежність температури паливного газу на виході з теплообмінника від масової витрати

З використанням програмного середовища MathCAD розробляємо програму теплового розрахунку теплообмінника (додаток Г).

Висновки за розділом

У цьому розділі виконано розрахунок параметрів фізико-хімічних властивостей природного газу для компонентного складу газу, що безпосередньо транспортується газопроводом «Прогрес».

Розглянуто процес стиснення природного газу у відцентровому нагнітачі типу ЦН 650-22-2 та зображено баланс його роботи на діаграмі в T-S координатах. Визначено площі, що еквівалентні величинам роботи, яка характерна для процесу стиснення та знайдено значення показника політропи. Розроблено математичну модель розрахунку добових значень показника політропи, залежно від режиму роботи нагнітача, та графічно зображено зміну адіабатичної та політропної робіт стиснення. За результатами розрахунку зроблено аналіз кількості теплоти, що може бути використана в рекуперативному теплообміннику, для підігріву паливного газу, що дозволить зменшити неефективні витрати природного газу на власні потреби.

Виконано розрахунок коефіцієнта теплопередачі, теоретичного та дійсного, за дійсних параметрів технологічного та паливного газу на вході та виході з теплообмінника. Проаналізувавши отримані значення можна зробити висновок, що на даний момент теплообмінник забруднений так, як коефіцієнт технічного стану $k_{tc}=0,44$. Необхідно провести технічне обслуговування, що забезпечить коефіцієнт теплопередачі близький до розрахункового.

Використання рекуперативного теплообмінника системи «газ-газ» призводить до економії природного газу на власні потреби та забезпечує надійну роботу регулятора тиску паливного газу ГПА, тому рекомендовано впроваджувати дану технологію підготовки паливного газу на інших компресорних станціях.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1. Вплив викидів забруднюючих речовин на навколишнє середовище та людину

Забруднення – привнесення в довкілля, а також виникнення в ньому нових, зазвичай не характерних для цього природного середовища фізичних, хімічних або біологічних речовин, що завдають шкоди людині, флорі й фауні [17].

Забруднення оксидами вуглецю та азоту відбувається за рахунок спалювання природного газу в КЗ ГТД та підігрівачів паливного газу.

Щорічно вміст CO_2 в атмосфері збільшується за рахунок антропогенних джерел. Значний вплив це явище має на глобальному рівні. Підвищення вмісту CO_2 в атмосфері є однією з причин виникнення парникового ефекту, що призводить до підвищення температури на планеті [17].

Якщо вплив діоксиду вуглецю CO_2 проявляється на глобальному рівні, то вплив монооксиду вуглецю CO проявляється на локальному рівні.

CO впливає на стан навколишнього середовища опосередковано. Сам по собі він не володіє сильнішим парниковим ефектом ніж CO_2 , але вступаючи в реакцію з OH -групою в атмосфері створюється вуглекислий газ CO_2 парниковий ефект якого значно більший, що в свою чергу збільшує концентрацію метану, який проявляє ще сильніший парниковий ефект [17].

Діоксиди азоту також згубно впливають на рослини. Окрім того, що за високої концентрації можливі кислотні дощі також вони можуть пригнічувати ріст деяких рослин за довгочасної дії при концентрації 470-1880 мкг/м³ [17].

Екологічна небезпека локального і регіонального забруднення атмосфери оксидами азоту полягає в тому, що вони здатні розчинятися в атмосферних опадах з утворенням азотної кислоти і проливатися на земну поверхню у формі кислотних дощів. В результаті проходження кислотних дощів закисляються ґрунти [17].

Будь-які забруднюючі атмосферне повітря речовини спричиняють негативний вплив на здоров'я людини. Потрапляючи в організм, переважно через систему дихання, великі частинки радіусом 0,01-0,1 мкм осідають там, від цього страждають органи дихання. Частинки, що проникли в організм людини, спричиняють токсичний ефект, бо вони:

- токсичні – за своєю хімічною або фізичною природою;
- слугують перешкодою для механізму очищення дихальних шляхів;
- слугують носієм поглиненої організмом ядовитої речовини.

Трапляються випадки коли забруднюючі речовини в комбінації один з одним призводять до більш серйозних розладів здоров'я, ніж при окремому впливу кожного з них. Значну роль відіграє тривалість впливу. За допомогою статистичного аналізу вдалось досить точно встановити залежність між рівнем забруднення повітря і захворюваннями дихальних шляхів такими, як ураження верхніх дихальних шляхів, серцева недостатність, бронхіт, астма, пневмонія та інші. Різке підвищення концентрації домішок, що зберігається протягом декількох днів, збільшує смертність людей похилого віку від респіраторних і серцево-судинних захворювань. У грудні 1930 у долині річки Маас (Бельгія) на протязі трьох днів відзначалось значне забруднення повітря, в результаті чого захворіло сотні людей, а 60 чоловік померли. У січні 1931 році в районі Манчестера (Великобританія) сильне задимлення спостерігалось на протязі дев'яти днів, що стало причиною смерті 592 людей. Дуже відомими стали випадки сильного забруднення атмосфери Лондона, що спричинило безліч смертей. Так у 1873 році в Лондоні несподівано померло 268 жителів. Результатом сильного задимлення в поєднанні з туманом, в період з 5 до 8 грудня 1852 року, були смерті більше 4000 людей. У січні 1956 року близько 1000 лондонців загинули в результаті тривалого задимлення. Велика частина тих, хто помер несподівано, страждали від бронхіту, емфіземи легенів або серцево-судинними захворюваннями. Всі ці події безумовно є результатом впливу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Серед найбільш

токсичних речовин виділяють оксид вуглецю CO, оксид сіри SO₂ і сірний ангідрид SO₃ та оксид азоту NO₂ [17].

Перевищення гранично допустимої концентрації CO спричиняє фізіологічні зміни в організмі людини, а концентрація більше 750 млн⁻¹ призводить до смерті. Пояснюється це тим, що CO є агресивним газом і легко з'єднується з гемоглобіном. При з'єднанні утворюється карбоксигемоглобін ріст вмісту в крові якого супроводжується:

- різким погіршенням зору і здатності оцінювати тривалість інтервалів часу;
- порушенням психомоторних функцій головного мозку (за вмісту 2-5%);
- зміною діяльності серця і легенів (за вмісту в крові більше, як 5%);
- головними болями;
- сонливістю;
- спазмами;
- порушеннями дихання.

Але вплив оксиду вуглецю залежить не лише від концентрації, а також від часу перебування в загазованому оксидом повітрі. Так наприклад за концентрації 10-50 млн⁻¹, що досить часто спостерігається в атмосфері площ і вулиць великих міст, за перебування 50-60 хв відмічаються наступні порушення погіршення зору і здатності оцінювати тривалість інтервалів часу, за часу перебування від 8-12 год до 6 тижнів – зміна діяльності серця і легенів. Спазми, порушення та втрата свідомості спостерігаються за концентрації CO 200 млн⁻¹ і за часу перебування 1-2 год виконуючи важку роботу та 3-6 год у стані спокою. Але на щастя процес утворення карбоксигемоглобін оборотний після припинення вдихання CO і процес виведення з крові у здорової людини кожні 3-4 год зменшується в два рази [17].

Найбільш шкідливий вплив на людину спричиняє діоксид сірки SO₂ і сірчаний ангідрид SO₃ у поєднанні зі зваженими частками і вологою. Запах SO₂ не відчувається до концентрації 0,3-1 млн⁻¹, а при концентрації понад 3 млн⁻¹

має гострий дратівливий запах, безбарвний і негорючий. Суміш діоксиду сірки SO_2 з твердими частинками та сірчаною кислотою призводить до збільшення симптомів утрудненого дихання та хвороб легенів за середньорічного вмісту $9,04-0,09 \text{ млн}^{-1}$ та концентрації диму $150-200 \text{ мкг/м}^3$, а за середньодобового вмісту $0,2-0,5 \text{ млн}^{-1}$ і концентрації диму $500-750 \text{ мкг/м}^3$ спостерігається різкий ріст числа хворих і смертельних випадків. За концентрації SO_2 $0,3-0,5 \text{ млн}^{-1}$ на протязі кількох днів настає хронічне ураження листя рослин, а також голок сосни [17].

Оксиди азоту, які за участю ультрафіолетової сонячної радіації поєднуються з вуглеводнями, утворюють пероксилацетилнітрат (ПАН) та інші фотохімічні окислювачі такі як пероксибензоїлнітрат (ПБН), озон, перекис водню.

Ці окислювачі – основні складові фотохімічного смогу, повторюваність якого велика в сильно забруднених містах, що розташовуються в низьких широтах північної і південної півкулі.

Оцінка швидкості фотохімічних реакцій, що призводять до утворення ПАН, ПБН і озону, показує, що в ряді південних міст колишнього Радянського Союзу влітку в обідні години (коли великий приплив ультрафіолетової радіації) ці швидкості перевершують значення, починаючи з яких відзначається утворення смогу.

Коричневий відтінок смогу обумовлений наявністю в складі ПАН діоксиду азоту і йодистого калію. За значної концентрації він випадає на землю у вигляді клейкої речовини і згубно діє на рослин. Дія окислювачів, а насамперед ПАН і ПБН, на організм людини виражається в сильному подразненні та запаленні очей, а в комбінації з озоном подразнюють носоглотку та призводять до спазмів грудної клітини, а за високої концентрації (більше за $3-4 \text{ мг/м}^3$) викликають сильний кашель та значно послаблюють можливість зосередитись [17].

Серед інших речовин, що мають значний вплив на людина можна виділити азбест, адже встановлено, що у людей які працюють з ним значно

підвищена вірогідність виникнення онкологічних захворювань бронхів і діафрагми, що розділяє грудну клітину та черевну порожнину. Не менш згубно на здоров'я людини впливає берилій. Він також може викликати онкологічні захворювання дихальний шляхів, а також шкіри та очей. Пари ртуті викликають порушення роботи центральної верхньої системи і нирок. Оскільки ртуть може накопичуватися в організмі людини, то в кінцевому підсумку її вплив призводить до розладу розумових здібностей. У зв'язку з постійним забрудненням, в містах постійно зростає число хворих, що страждають на захворювання такі, як хронічний бронхіт, емфізема легенів, різні алергічні захворювання та рак легенів [17].

Забруднення навколишнього середовища оксидами вуглецю CO, азоту NO₂ має негативні наслідки, як для людини так і для середовища в якому вона живе. Для забезпечення нормального життя та збереження навколишнього середовища безумовно необхідно контролювати викиди оксидів та робити стандарти, що нормують кількість викидів більш жорсткими. З цією метою визначимо кількість викидів оксидів азоту та вуглецю і економічно оцінимо екологічні збитки від забруднення атмосфери підігрівачем паливного газу «Факел» «ПГ-30».

3.2. Розрахунок викидів забруднюючих речовин

Визначимо масу викидів шкідливих речовин в результаті роботи підігрівача паливного газу «Факел» «ПГ-30» на номінальному режимі [18]. Показники, що характеризують процес роботи, приймаємо відповідно до [8].

Визначимо час роботи на номінальному режимі за рік t_n за формулою:

$$t_n = n_{\text{дiб}} \cdot t_{\text{дiб}} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ (год)},$$

де $n_{\text{дiб}}=365$ – річна кількість діб;

$t_{\text{дiб}}=24$ – тривалість однієї доби, год.

Визначаємо масову витрату палива на номінальному режимі роботи за годину:

$$V_n = q_n \cdot \rho_n = 70 \cdot 0,754 = 52,8 \left(\frac{\text{кг}}{\text{год}} \right)$$

де q_n – годинна витрата паливного газу, $\text{м}^3/\text{год}$;

ρ_n – густина газу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Визначимо витрату паливного газу за рік напрацювання:

$$V = n_{\text{діб}} \cdot t_{\text{діб}} \cdot q = 365 \cdot 24 \cdot 52,8 = 462,4 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

Знайдемо значення нижчої теплоти згоряння природного газу відповідного до компонентного складу визначеного в розділі 2 за формулою [10]:

$$Q_{\text{го}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{гоі}} \cdot r_i = \frac{39,82 \cdot 95,321 + 70,31 \cdot 2,668 + 101,21 \cdot 0,831 + 133,4 \cdot 0,254}{100\%} + \frac{169,3 \cdot 0,041 + 133,4 \cdot 0,254 + 169,3 \cdot 0,041 + 187,4 \cdot 0,017}{100\%} = 41,1 \left(\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} \right)$$

де $Q_{\text{го}}$ – нижча теплота згоряння палива за об'ємом, $\text{МДж}/\text{м}^3$;

$Q_{\text{гоі}}$ – нижча теплота згоряння відповідного компонента, $\text{МДж}/\text{м}^3$.

Визначимо нижчу теплоту згоряння газу за масою:

$$Q_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{го}}}{\rho_n} = \frac{41,1}{0,754} = 54,5 \left(\frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \right)$$

Відповідно до [18] визначаємо показники емісії для оксиду вуглецю k_{CO} та діоксиду азоту k_{NO_2} :

$$k_{CO} = 248,8 \left(\frac{\Gamma}{\GammaДж} \right)$$

$$k_{NO_2} = 64,3 \left(\frac{\Gamma}{\GammaДж} \right)$$

Знаходимо значення викидів оксиду вуглецю E_{CO} і діоксиду азоту E_{NO_2} :

$$E_{CO} = 10^{-6} k_{CO} Q_r B = 10^{-6} \cdot 248,8 \cdot 54,5 \cdot 462,4 = 6,3 \left(\frac{\Gamma}{\text{рік}} \right)$$

$$E_{NO_2} = 10^{-6} k_{NO_2} Q_r B = 10^{-6} \cdot 64,3 \cdot 54,5 \cdot 462,4 = 4,2 \left(\frac{\Gamma}{\text{рік}} \right)$$

Визначимо значення миттєвих викидів оксиду вуглецю M_{CO} і діоксиду азоту M_{NO_2} :

$$M_{CO} = \frac{10^6 E_{CO}}{3600 t_{II}} = \frac{10^6 \cdot 6,3}{3600 \cdot 8760} = 0,2 \left(\frac{\Gamma}{\text{с}} \right)$$

$$M_{NO_2} = \frac{10^6 E_{NO_2}}{3600 t_{II}} = \frac{10^6 \cdot 4,2}{3600 \cdot 8760} = 0,132 \left(\frac{\Gamma}{\text{с}} \right)$$

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 і-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 і-го інгредієнта, т/рік;

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

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

f_i - коефіцієнт, що враховує характер розсіювання і-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-32«П» приймаємо, як для промзони $\sigma=0,8$.

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

$$M_{\text{CO}}^{\alpha} = E_{\text{CO}} = 6,3 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

$$M_{\text{NO}_2}^{\alpha} = E_{\text{NO}_2} = 4,2 \left(\frac{\text{т}}{\text{рік}} \right)$$

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

$$Y_{\text{CO}}^{\alpha} = 6,3 \cdot 90 \cdot 0,8 \cdot 2,2 = 998 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

$$Y_{\text{NO}_2}^{\alpha} = 4,2 \cdot 280 \cdot 0,8 \cdot 2,2 = 2070 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

Обчислимо значення загального економічного збитку за рік роботи підігрівача ПГ-30 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]:

$$Y = 28,4 \cdot 1,2 \cdot (998 + 2070) = 104557 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

3.4. Заходи для зменшення викидів оксиду азоту та вуглецю

До основних заходів зменшення викидів забруднюючих речовин під час спалювання природного газу можна віднести заходи направлені на [20]:

- зниження температури горіння;
- зменшення часу перебування продуктів згоряння в області високих температур;
- створення зон реакцій з відновлювальною атмосферою (надлишок повітря менше одиниці).

Для зниження викидів оксидів азоту проводять наступні первинні або режимно-технологічні заходи [20]:

- використання горілок з низьким викидом NO_x (зниження NO_x до 60%);
- ступінчате спалення палива (зниження NO_x на 35%-45%);
- ступінчасту подачу повітря (зниження NO_x до 50%);
- рециркуляцію димових газів (зниження NO_x до 33%);
- вприск води в ядро факела (зниження NO_x на 25%-44%);
- комбінацію первинних заходів.

Висновки за розділом

У даному розділі проведено аналіз впливу викидів оксиду азоту та оксиду вуглецю на навколишнє середовище та людину. Визначено річні та миттєві викиди забруднюючих речовин для підігрівача паливного газу «ПГ-30» для номінального режиму роботи. Визначено методи зменшення викидів забруднюючих речовин при спалюванні паливного газу. Обраховано значення загального економічного збитку за рік напрацювання підігрівача, який складає

$$Y = 104557 \left(\frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right)$$

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори, які можуть впливати на працівників в умовах КС

Залежно від часу і інтенсивності впливу на працівника, виробничі фактори можуть бути небезпечними або шкідливими [21].

При миттєвій дії фактор стає небезпечним, а при тривалому впливі — шкідливим.

Небезпечним називають виробничий фактор, вплив якого на організм працюючого у відповідних умовах праці може призвести до травм або іншого раптового, різкого погіршення стану здоров'я.

Шкідливим називають виробничий фактор, вплив якого на організм працюючого може призводити в певних умовах до захворювання або зниження рівня працездатності.

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» поділяються за природою дії на групи [22]:

- фізичні;
- хімічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Визначимо фактори, що відносяться до наведених груп, які можуть виникати в умовах роботи на КС. До фізичних небезпечних і шкідливих факторів можна віднести [22]:

- рухомі машини і механізми;
- рухомі частини виробничого обладнання;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена або понижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;

- підвищена або понижена вологість повітря;
- підвищена або понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена або понижена рухомість повітря;
- гострі кромки, шорсткість на поверхні заготовок, інструменту;
- підвищене значення напруги в електричному колі;
- підвищений рівень статичної напруги.

Хімічні небезпечні і шкідливі фактори, що можуть діяти на технічний персонал в умовах роботи на КС [22]:

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

До психофізіологічних небезпечних і шкідливих факторів можна віднести наступні фактори [22]:

- фізичні перевантаження – статичні, динамічні;
- нервово-психічні перевантаження – розумові перенавантаження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження.

4.2. Вплив шкідливих факторів на людину та конструктивні рішення і заходи зменшення їх впливу

Мікроклімат виробничого приміщення здійснює суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність. Мікрокліматом називають клімат внутрішнього середовища виробничого приміщення, який визначається температурою, відносною вологістю, рухом повітря та тепловим випромінюванням нагрітих поверхонь, що в сукупності впливають на тепловий стан організму людини [23].

Людина постійно перебуває в тепловій взаємодії з виробничим середовищем під час виконання трудової діяльності. Якщо мікрокліматичні умови нормальні, то температура тіла працівника буде постійною (36,6°C), завдяки терморегуляції. Залежно від фізичного навантаження працівника кількість тепла, що утворюється в організмі буде змінюватись, а рівень тепловіддачі залежить від мікрокліматичних умов виробничого приміщення.

В основному віддача тепла з організму людини відбувається за рахунок випромінювання і випаровування вологи з поверхні шкіри. Тепло віддаватиметься за рахунок випромінювання тим більше чим нижча температура повітря і швидкість його руху. При високій температурі значна частина тепла втрачається випаровуванням поту. Втрачаючи піт організм втрачає також воду, вітаміни, мінеральні солі тому і зневоднюється, порушується обмін речовин. Саме через це працівники «гарячих» цехів забезпечуються газованою підсоленою водою [23].

Вологість повітря істотно впливає на віддачу тепла випаровуванням. Віддача тепла буде зменшуватись, тому що утруднюється випаровування через високу вологість. Зниження вологості покращує процес тепловіддачі випаровуванням. Проте занадто низька вологість викликає висихання слизових оболонок дихальних шляхів [23].

Рівень тепловіддачі з поверхні шкіри конвекцією і випаровуванням визначає рухомість повітря. Збільшенню віддачі тепла організмом, у жарких виробничих приміщеннях, сприяє рух повітря за температури рухомого повітря до 35°C. З підвищенням температури рухоме гаряче повітря саме буде віддавати своє тепло тілу людини, викликаючи його нагрівання.

Переохолодження організму викликає рухоме повітря при низькій температурі. Різкі коливання температури в приміщенні, яке продувається холодним повітрям (протягом), значно порушують терморегуляцію організму і можуть викликати простудні захворювання.

Хоча і можливості організму пристосуватись до метеорологічних умов значні, проте не безмежні. Для людини, що знаходиться у стані спокою

верхньою межею терморегуляції прийнято вважати 30–31 °С за відносної вологості повітря 85% чи 40 °С при відносній вологості 30%. Ця межа буде значно нижча при виконанні фізичної роботи . Так, при виконанні важкої роботи теплова рівновага зберігається при температурі повітря 12–14 °С.

Отже, для нормального теплового самопочуття людини важливе певне співвідношення температури, відносної вологості і швидкості руху повітря.

Основним нормативним документом, що визначає параметри мікроклімату виробничих приміщень є санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99.

Чистота повітря являється необхідною складовою для створення нормальних умов виробничої діяльності, адже в повітря можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, як наслідок виробничої діяльності [23].

Вони можуть проникати в організм, як через органи дихання так і через органи травлення, а також шкіру та слизові оболонки. Пари, газо- та пилоподібні речовини потрапляють в організм через дихальні шляхи, а рідкі речовини потрапляють до організму переважно через шкіру. Під час ковтання або при внесенні брудними руками їжі до рота шкідливі речовини потрапляють до шлунково-кишкових шляхів.

Шкідливі речовини потрапивши в організм можуть викликати гострі або хронічні отруєння. Тяжкість отруєння залежатиме від токсичності речовини, її кількості, часу дії, шляху проникнення, метеорологічних умов, індивідуальних особливостей організму. Результатом одноразової дії великих доз шкідливих речовин будуть гострі отруєння (чадний газ, метан, сірководень). Результатом тривалої дії невеликих концентрацій шкідливих речовин (свинець, ртуть, марганець) будуть хронічні отруєння. Розподіл шкідливих речовин, що потрапили в організм буде нерівномірним. Найбільше свинцю накопичиться в кістках, фтору в зубах, марганцю в печінці.

Порушення здоров'я людини, при потраплянні шкідливих речовин, відбуватиметься лише у тому випадку, коли їхня кількість в повітрі перевищуватиме граничну для кожної речовини величину.

Відповідно до ГОСТ 12.1.007-76 шкідливі речовини за ГДК поділяються на чотири класи [24]:

- 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні, ГДК менше 0,1 мг/м³ (свинець, ртуть, озон);
- 2-й клас – речовини високо небезпечні, ГДК 0,1-1,0 мг/м³ (кислоти сірчана та соляна, хлор, фенол і т.д.);
- 3-й клас – речовини помірно небезпечні, ГДК 1,1-10,0 мг/м³ (вінілацетат, толуол, ксилол, спирт метиловий);
- 4-й клас – речовини мало небезпечні, ГДК більше 10,0 мг/м³ (аміак, бензин, ацетон, гас).

До заходів боротьби з забрудненням повітря на виробництві та захисту працюючих включають [23]:

- вилучення шкідливих речовин з технологічних процесів, заміна шкідливих речовин менш шкідливими і т. п.;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування (застосування замкнених технологічних циклів, неперервних технологічних процесів);
- автоматизація і дистанційне управління технологічними процесами та обладнанням, що виключає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;
- нормальне функціонування систем опалення, загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів в атмосферу;
- контроль за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту.

Світло відіграє одну з ключових ролей серед чинників зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці. Вплив світла відбувається не лише на функцію зору, а й на діяльність організму в цілому: посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу [23].

Через недостатню або надмірну освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору настає втома очей, що призводить до зниження продуктивності праці при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надто яскраве джерело світла може стати причиною головного болю, різі в очах, розладу гостроти зору, а світові відблиски можуть бути причиною тимчасового засліплення.

Основні вимоги, які висуваються до виробничого освітлення, що сприяло б зоровій роботі, виключало б швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків та сприяло б підвищенню продуктивності праці та якості продукції є [23]:

- створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми;
- не повинно бути засліплюючої дії, як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору;
- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частої переадаптації органів зору;
- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней (особливо рухомих);
- повинен бути достатній, для розрізнення деталей, контраст поверхонь, що освітлюються;
- не створювати небезпечних та шкідливих виробничих факторів (шум, теплові випромінювання, небезпечне ураження струмом, пожежо- та вибухонебезпека світильників);

- повинно бути надійним і простим в експлуатації, економічним та естетичним.

Звуковими коливаннями називають акустичні коливання, що лежать в діапазоні частот 16-20000 Гц. Людське вухо з нормальним слухом здатне сприйняти їх [23].

Для молодої здорової людини порогове значення слуху складає 0 дБ при частоті 1000 Гц. Так як вухо людини менш чутливе до низькочастотних звуків, то поріг слухового відчуття при частоті 100 Гц буде вищим.

Больовим порогом називають звук з інтенсивністю 140 дБ, відповідає звуковому тиску 200 Па та інтенсивності 100 Вт/м². Звуковий тиск у понад 120 дБ називають порогом дискомфорту (біль у вусі). Шум з рівнем звукового тиску 30-35 дБ взагалі не турбує людину, а підвищення рівня до 40-70 дБ спричиняє значне навантаження на нервову систему, що призводить до погіршення самопочуття, зниження продуктивності. При тривалому впливу шуму інтенсивністю понад 75 дБ може виникати погіршення слуху. Дія шуму рівнем понад 140 дБ може викликати розрив барабанних перетинок, контузію, а при дії шуму понад 160 дБ може настати смерть. Величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6-037-99 [25].

Зменшення впливу шуму на людину повинно забезпечуватись розробкою і впровадженням більш шумобезпечної техніки, застосуванням будівельно-акустичних методів, застосуванням засобів індивідуального захисту.

Негативний вплив на людину здійснює вібрація [23].

Характер та ступінь поширення коливань по тілу людини визначається їх частотою, амплітудою, тривалістю дії, площею контакту тіла людини та джерела вібрації, місцем прикладання та напрямком вібраційного впливу, демпферними властивостями тканин.

Вплив вібрації на людину:

- подразнювальний;
- зміщення органів;
- деформації тканин та клітин окремих органів.

Наслідками впливу вібрації є:

- зниження працездатності;
- порушення функцій центральної нервової системи;
- порушення функцій опорно-рухового апарату;
- порушення функцій статевих органів.

4.3. Розрахунок освітлення приміщення головного щита управління КС

Розрахунок освітлення виконуємо за методом світлового потоку відповідно до рекомендацій [26] для приміщення розмірами:

- $A=12$ – довжина приміщення, м;
- $B=8$ – ширина приміщення, м.

Основним рівнянням методу світлового потоку є:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot k_{\text{з}} \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta}, \quad (4.1)$$

де $\Phi_{\text{л}}$ - розрахункове значення світлового потоку однієї лампи в кожному світильнику, лм;

$E_{\text{н}}$ - нормоване значення освітленості, лм;

S – площа освітлюваної поверхні, м^2 ;

$k_{\text{з}}$ - коефіцієнт запасу;

Z – коефіцієнт мінімальної освітленості;

N – загальна кількість світильників;

n – кількість ламп у одному світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Значення нормованого загального освітлення $E_{\text{н}}$ обираємо відповідно до діючих державних норм ДБН В.2.5-28-2006 [27]. Обираємо категорію зорової роботи VIII для якої нормоване освітлення становить $E_{\text{н}} = 200$ лм.

Відповідно до [26] визначаємо ступінь захисту від пилу та вологи та числове значення коефіцієнта світильника $[L/h]$ – відношення відстані L між

рядами або сусідніми світильниками у ряду до висоти h їхнього підвісу над робочою поверхнею. Відповідно до використання обираємо тип світильника ЛПО для люмінесцентних ламп, чотирьохламповий з мінімальною висотою підвісу над підлогою 2,5 м, стандарт захисту IP20, $[L/h]=1,4$. Згідно з [26] визначаємо коефіцієнт запасу освітленості k_3 , що враховує зниження рівня освітленості з часом в результаті забруднення та старіння ламп, світильників і поверхонь приміщення. Приймаємо $k_3 = 1.5$.

Розраховуємо кількість рядів N_p світильників у приміщенні за формулою:

$$N_p = \frac{B}{(H - h_p)[L/h]} = \frac{8}{(4 - 1) \cdot 1,4} = 1,9 \quad (\text{шт}),$$

де $H=4$ – висота приміщення, м;

$h_p=1$ – висота робочої поверхні, м.

Число рядів округлюємо до більшого цілого значення $N_p=2$.

Визначимо максимально припустиму відстань між рядами світильників

L_{\max} :

$$L_{\max} = \frac{B}{N_p} = \frac{8}{2} = 4 \quad (\text{м}).$$

Визначаємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею h :

$$h = \frac{L_{\max}}{[L/h]} = \frac{4}{1,4} = 2,85 \quad (\text{м}).$$

Знайдемо висоту звисання світильника від стелі h_3 :

$$h_3 = H - h_p - h = 4 - 1 - 2,85 = 0,15 \quad (\text{м}).$$

Визначимо значення індексу приміщення i , що характеризує співвідношення розмірів освітлювального приміщення і висоти розміщення світильників:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 12}{2,85 \cdot (8 + 12)} = 1,68.$$

За рекомендаціями [26] визначимо коефіцієнт використання світлового потоку η для:

- світильника ЛПО;
- визначеного індексу приміщення i ;
- коефіцієнту відбиття для стелі $\rho_{ст} = 50\%$;
- коефіцієнту відбиття для стін $\rho_c = 30\%$;
- коефіцієнту відбиття для підлоги $\rho_{п} = 10\%$.

Обираємо значення $\eta = 49\%$.

Знаходимо значення сумарного потоку освітлювальної установки у даному приміщенні Φ_{Σ} :

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot k_3 \cdot z}{\eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 12 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,49} = 64453,1 \text{ (лм)},$$

де $z = 1,1$ – коефіцієнт нерівномірності освітленості для люмінесцентних ламп відповідно до [26].

Умовна загальна кількість світильників визначиться, як:

$$N_{св}^* = \frac{A \cdot B}{L_{max}^2} = \frac{8 \cdot 12}{4^2} = 24 \text{ (шт.)}$$

Світловий потік умовного джерела світла $\Phi_{\text{л}}^*$:

$$\Phi_{\text{л}}^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_{\text{л}}^*}, \quad (4.2)$$

де $N_{\text{л}}^*$ - загальна кількість ламп у світильнику, шт.

Загальна кількість ламп визначається за формулою:

$$N_{\text{л}}^* = N_{\text{св}}^* \cdot n = 24 \cdot 4 = 96 \quad (\text{шт}).$$

Тоді світловий потік умовного джерела світла $\Phi_{\text{л}}^*$ визначиться:

$$\Phi_{\text{л}}^* = \frac{64453,1}{96} = 671,4 \quad (\text{лм}).$$

Обираємо тип стандартної лампи за найближчим значенням світлового потоку $\Phi_{\text{л}}$ до визначеного світлового потоку умовного джерела. Обираємо лампу ЛДЦ 20. Відповідно до ГОСТ 6825-74 «Лампы люминесцентные ртутные низкого давления. Технические условия» параметри лампи [28]:

- потужність – 20 Вт;
- світловий потік лампи – 850 лм;
- довжина лампи – 0,6 м.

Знаходимо значення коефіцієнта m , що дорівнює співвідношенню розрахункового світлового потоку $\Phi_{\text{л}}^*$ до фактичного світлового потоку обраної лампи $\Phi_{\text{л}}$:

$$m = \frac{\Phi_{\text{л}}^*}{\Phi_{\text{л}}} = \frac{671,4}{850} = 0,789.$$

Знаходимо значення фактичної кількості світильників у приміщенні $N_{\text{св}}$:

$$N_{\text{св}} = N_{\text{св}}^* \cdot m = 24 \cdot 0,789 = 18,9 \quad (\text{шт}).$$

Кількість світильників округлюємо до цілого значення $N_{\text{св}} = 20$ (шт).

Тоді фактична кількість ламп $N_{\text{л}}$:

$$N_{\text{л}} = N_{\text{св}} \cdot n = 20 \cdot 4 = 80 \quad (\text{шт}).$$

Визначаємо загальну розрахункову освітленість E_p у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп ЛДЦ-20:

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot k_3 \cdot Z} = \frac{850 \cdot 80 \cdot 0,49}{8 \cdot 12 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 210,4 \quad (\text{лм}).$$

Розраховане значення освітленості E_p перевищує нормоване значення не більше ніж на 20%, тому результати розрахунків вважаємо вірними.

Визначаємо загальну потужність освітлювальної установки P_{Σ} :

$$P_{\Sigma} = N_{\text{л}} \cdot P_{\text{л}} = 80 \cdot 20 = 1600 \quad \text{Вт}.$$

4.4. Пожежо- і вибухонебезпека при роботі на КС

У відповідності з ДНАОП №51.30-1.06-98 та ГОСТ 12.1.004.-91 і ГОСТ 12.1.010-75 система автоматичного пожежогасіння експериментального стенду входить у блок забезпечення обладнання (відсік пожежогасіння).

Система автоматичного пожежогасіння забезпечує пожежний захист відсіків камери згоряння, відцентрового нагнітача, паливної системи і котла (автоматичний, ручний з відсіку пожежогасіння та дистанційний з

операторної). Спосіб гасіння пожежі — об'ємний, вогнегасна речовина — двоокис вуглецю CO_2 .

Майданчик експериментального приміщення передбачено обладнати системою автоматичного газового пожежогасіння простір під фальшполом приміщення електрощитової ВЕБа.

Для автоматичного виявлення і гасіння осередків пожежі в підпідлоговому просторі електрощитової запроектована централізована автоматична установка газового пожежогасіння (АУГП). Спосіб гасіння пожежі — об'ємний.

Розрахункова маса газової вогнегасної речовини CO_2 — 150 кг.

Після спрацювання основного запасу газової вогнегасної речовини (ГВР), у разі повторного займання або невиконання АУГП свого завдання, батареї резервного запасу ГВР готові до негайного застосування.

Батареї газового пожежогасіння розміщуються в окремому приміщенні станції пожежогасіння у ВЕБі. Кімната пожежогасіння відділена від інших приміщень протипожежними перегородками 1-го типу і перекриттям 3-го типу і має окремий вихід.

В кімнаті пожежогасіння передбачений телефон.

На вході в приміщення станції встановлюється світлове табло «КІМНАТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ».

Для контролю за масою CO_2 в балонах в кімнаті пожежогасіння передбачені контрольні ваги.

Установка автоматичного пожежогасіння має дистанційний і місцевий пуск і знаходиться в режимі автоматичного цілодобового чергування.

Автоматичний пуск установки газового пожежогасіння передбачається від пожежних сповіщувачів, які встановлені в об'ємах, що захищаються, із затримкою випуску газової вогнегасної речовини на час, необхідний для евакуації людей і зупинки вентиляційного обладнання, але не менше за 30 с.

Продування трубопроводів і колекторів АУГП здійснюється стисненим повітрям від балону повітряного переносного.

Для видалення залишків вогнегасної речовини з об'ємів, що захищаються, після спрацювання АУГП передбачений димовсмоктувач переносний пожежний, який встановлюється в кімнаті пожежогасіння.

Трубопроводи газового пожежогасіння монтуються зі сталевих безшовних труб по ГОСТ 8734-75 і фарбуються емаллю ПФ-133 червоного кольору з нанесенням виду речовини, що транспортується, цифрами: вуглекислий газ — 5.4.

4.5. Інструкція з техніки безпеки оператора МГ

До самостійної роботи оператором МГ допускаються особи у віці не молодше 18 років, які у навчальному закладі отримали професію оператор МГ та за станом здоров'я можуть бути допущені до вказаної роботи. Перед допуском до самостійної роботи, після отримання вступного інструктажу, первинного інструктажу, попереднього спеціального навчання з питань охорони праці, перевірки знань з охорони праці, яка проводиться за екзаменаційними білетами, перевірки вмінь та навичок безпечного виконання робіт, оператор МГ повинен пройти безпосередньо на робочому місці стажування протягом 2-15 змін (залежно від стажу, досвіду і характеру роботи) під керівництвом досвідченого кваліфікованого оператора МГ. Допуск до самостійної роботи здійснюється при позитивних результатах стажування, перевірки вміння та навичок безпечного виконання робіт [29].

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 [29].

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 [29].

Висновки за розділом

В розділі наведені небезпечні та шкідливі фактори, що можуть діяти на експлуатуючий персонал КС та розглянуто їх вплив на людину та загальні засоби боротьби з такими факторами. Проведено розрахунок освітленості приміщення головного щита управління КС. В результаті проведення розрахунків обрано світильник типу ЛПО та люмінесцентні лампи ЛДЦ 20. Отримано кількість рядів світильників $N_p=2$, кількість світильників $N_{св} = 20$ (шт), кількість ламп $N_{л} = 80$ (шт). Розраховано значення потужності світлової установки $P_{\Sigma} 1600$ Вт. Розглянуто пожежо- та вибухонебезпеку на КС. Наведено інструкцію оператора МГ.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі розглянуто впровадження енергозберігаючих технологій на базі КС-32 «П» м. Ромни.

Визначено основні технічні показники для КС та газопроводу, що обслуговується. Розглянуто основне обладнання, що використовується в технологічному процесі компримування природного газу: блок очистки та осушки технологічного газу, апарат повітряного охолодження природного газу, ГПА та їх основні технічні показники. Розглянуто основні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій на базі КС-32 «П» та визначено доцільність модернізації КС.

Наведено опис конструкції та принципу роботи підігрівача паливного газу ПГ-30, визначено основні технічні показники. Розглянуто конструкцію та принцип роботи рекуперативного теплообмінника, що використовується для підігріву паливного газу. Наведено основні переваги даного теплообмінника перед підігрівачем ПГ-30.

Виконано розрахунок параметрів фізико-хімічних властивостей природного газу для компонентного складу газу, що безпосередньо транспортується газопроводом «Прогрес».

Розглянуто процес стиснення природного газу у відцентровому нагнітачі ЦН 650-22-2 та зображено баланс роботи в T-S координатах. Розроблено математичну модель розрахунку добових значень показника політропи, залежно від режиму роботи нагнітача, та графічно зображено зміну адіабатичної та політропної робіт стиснення. За результатами розрахунку зроблено аналіз кількості теплоти, що може бути використана в рекуперативному теплообміннику, для підігріву паливного газу, що дозволить зменшити неефективні витрати природного газу на власні потреби.

Виконано розрахунок коефіцієнта теплопередачі, теоретичного та дійсного, за дійсних параметрів технологічного та паливного газу на вході та виході з теплообмінника. За результатами розрахунку визначено коефіцієнт

технічного стану теплообмінника та побудовано графік залежності температури паливного газу на виході з теплообмінника залежно від витрати його витрати.

Виходячи з вище наведеного показано, що:

- дійсне значення коефіцієнту теплопередачі $k_p=66$, а теоретичне $k_t=150,5$. Це говорить про те, що теплообмінник терміново підлягаю технічному обслуговуванню;
- використання в роботі рекуперативного теплообмінника приводить до економії природного газу в обсязі 1680 м³/добу (підігрівач газу ПГ-30 вимикається);
- з метою економії природного газу на власні потреби, рекомендовано впроваджувати рекуперативний теплообмінник на інші КС.

Розглянуто вплив викидів оксиду вуглецю та оксиду азоту, що утворюються в процесі згоряння природного газу під час роботи підігрівача ПГ-30, на навколишнє середовище та на людину. Визначено масу річних викидів оксиду вуглецю та оксиду азоту в атмосферу та розраховано завданий економічний збиток навколишньому середовищу.

Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, що можуть впливати на експлуатуючий персонал КС, відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» їх вплив та заходи щодо зменшення їх впливу. Проведено розрахунок освітленості приміщення головного щита управління в ході якого визначено тип застосованих світильників та люмінесцентних ламп, їх кількість та загальну потужність. Розглянуто пожежо- та вибухонебезпеку на КС. Приведено інструкцію для оператора МГ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сумське ЛВУ МГ [Електронний ресурс]: за даними ПАТ «Укртрансгаз» – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сумське_ЛВУМГ.
2. Мельник О. С. Методи регулювання подачі паливного газу двигуна газоперекачувального агрегату потужністю 25 МВт.: дипл. роб. на здобуття освітнього ступеня бакалавр: спец. 142 «Енергетичне машинобудування»/Мельник Олександр Сергійович; Національний авіаційний ун-т. – Київ, 2018. – 83 с.
3. Характеристика газопроводу «Прогрес» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://fb.ru/article/143345/gazoprovod-cherez-ukrainu-v-evropu---shema-i-marshrut>.
4. Козаченко, А. Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов [Текст] : справочник / А. Н. Козаченко. – М. : Нефть и газ, 1999. – 275с.
5. Офіційний сайт ООО «Машзавод». Режим доступу – <http://mashzavod.com/ru/>.
6. Офіційний сайт ООО «ДЗЕРДЖИНСКХИММАШКОМПЛЕКТ». Режим доступу - <https://chimmash.ru>.
7. Офіційний сайт ТД «СААРЗ». Режим доступу - <https://tdsarrz.ru/>.
8. Паспорт подогревателя газа с промежуточным теплоносителем «ФАКЕЛ» ПГ-30» (Ф1121.00.00.00.000 ПС) [Текст]. – Фастов: Издательство «ФАКЕЛ», 2012. – 52 с.
9. Паспорт сосуда (0308368413012903) [Текст]. – Черновцы: Черновцы облполиграфиздат, 1986. – 15 с.
10. Трубопроводный транспорт газа: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Сусак О. М., Касперович В. К., Андрійшин 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., Казанджан П.К., Алексеев Л.П., Гворов А.Н., Нечаев Ю.Н. Теория реактивных двигателей. – Оборонгиз, 1956.
13. 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.
14. Марочник сталей [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/search/.
15. Загорученко В.А., Журавлев А.М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. – Москва, 1969, 237 с.
16. МИХЕЕВ М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - М. : Энергия, 1973. – 320с.
17. Аникушкин А.С., Григорчук К.В. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ОКИДАМИ АЗОТА И УГЛЕРОДА // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 10. – С. 64-66
18. СОУ 11.-30019775-032:2004. «Викиди забруднювальних речовин в атмосферне повітря від основних виробництв та технологічних процесів ДК «Укртрансгаз». Методика визначення питомих показників»
19. Економіка природокористування. Методичні вказівки для виконання практичних занять / Мартиненко А.П., Мартиненко В.Г., 2017.
20. Методи зниження емісії оксидів азоту [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/3545845/page:2/>.
21. Шкідливі і небезпечні виробничі фактори [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://oppb.com.ua/news/shcho-take-shkidlyvi-i-nebezpechni-vyrobnychi-factory>.
22. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ. 01.01.76.

23. Вплив виробничого середовища на здоров'я та працездатність людини [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/berezyuk_bezpeka_zhittyediyalnosti/45.htm.
24. ГОСТ 12.1.007–76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 10.03.76.
25. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Київ, 1999.
26. Жидецький В.Ц. Практикум з охорони праці / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигирей, В.М. Сторожук, Л.В. Туряб, Х.І. Лико. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.
27. ДБН В.2.5-28-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. Київпромелектропроект.
28. ГОСТ 6825-74. Лампы люминесцентные ртутные низкого давления. – Введ. 01.01.1977.
29. ПІ 1.1.23-207-2002. Примірні інструкції з охорони праці для оператора магістральних газопроводів.

Розрахунок фізико-хімічних властивостей природного газу

$$\text{CH}_4 := 95.320$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 := 2.668$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 := 0.831$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} := 0.254$$

$$\text{C}_5\text{H}_{12} := 0.0414$$

$$\text{C}_6\text{H}_{14} := 0.0174$$

$$\text{O}_2 := 0.0031$$

$$\text{N}_2 := 0.632$$

$$\text{CO}_2 := 0.232$$

$$P_{vs} := 53.598066.5 = 5.247 \times 10^6$$

$$P_{nag} := 70.498066.5 = 6.904 \times 10^6$$

$$T_{norm} := 273$$

$$T_{st} := 293$$

$$T_n := 47$$

$$T_{vs} := 22$$

$$\rho_{pov} := 1.204$$

$$C_p := 4187 \frac{\text{CH}_4 \cdot 0.51725 + \text{C}_2\text{H}_6 \cdot 0.3934 + \text{C}_3\text{H}_8 \cdot 0.3704 + \text{C}_4\text{H}_{10} \cdot 0.3802 + \text{C}_5\text{H}_{12} \cdot 0.3805 + \text{C}_6\text{H}_{14} \cdot 0.3827 + \text{O}_2 \cdot 0.2185 + \text{N}_2 \cdot 0.2482 + \text{CO}_2 \cdot 0.1946}{100} = 2.138 \cdot 10^3$$

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

$$R_{ww} := \frac{(52.95 \cdot \text{CH}_4 + 28.19 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 19.23 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 14.96 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 11.76 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 9.84 \cdot \text{C}_6\text{H}_{14} + 26.4 \cdot \text{O}_2 + 30.26 \cdot \text{N}_2 + 19.27 \cdot \text{CO}_2)}{100} \cdot 9.81 = 506.84$$

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

$$\rho_{st} := \rho \cdot \frac{T_{norm}}{T_{st}} = 0.703$$

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

$$k := \frac{C_p}{C_v} = 1.31$$

Розрахунок показника політропи нагнітача ЦН 650-22-2

i := 0.. 25

$T_{\text{мг}}$:=

0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
46
47
48

$T1 := T + 273 =$

	0
0	273
1	275
2	277
3	279
4	281
5	283
6	285
7	287
8	289
9	291
10	...

$$S1 := Cv \cdot \ln \left(\frac{T1^k}{Pvs^{k-1}} \right) =$$

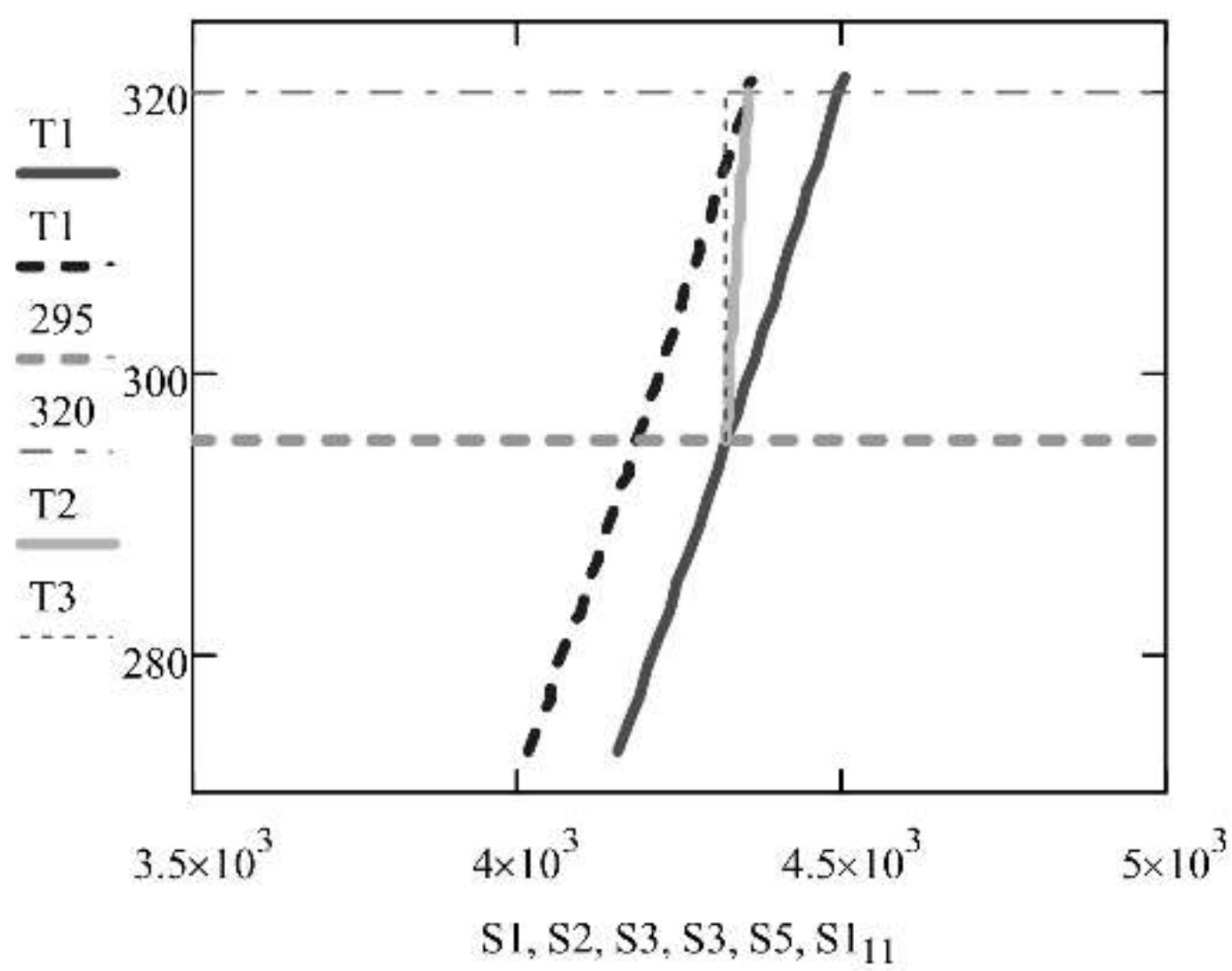
	0
0	$4.158 \cdot 10^3$
1	$4.173 \cdot 10^3$
2	$4.189 \cdot 10^3$
3	...

$$S2 := Cv \cdot \ln \left(\frac{T1^k}{Pnag^{k-1}} \right) =$$

	0
0	$4.019 \cdot 10^3$
1	$4.034 \cdot 10^3$
2	$4.05 \cdot 10^3$
3	$4.065 \cdot 10^3$
4	...

$$S3 := 3500..5000$$

$$T3 := 295..320$$



$$T4 := \left(\frac{S1_{11}}{e^{Cv} \cdot Pnag^{k-1}} \right)^{\frac{1}{k}} = 314.801$$

$$F1 := (S1_{11} - S2_{11}) \cdot T1_{11} = 4.091 \times 10^4$$

$$F2 := \frac{1}{2} \cdot (S1_{11} - S2_{11}) \cdot (T4 - T1_{11}) = 1.373 \times 10^3$$

$$Lad := F1 + F2 = 4.2284 \times 10^4$$

$$F3 := (S2_{24} - S1_{11}) \cdot (T4 - T1_{11}) = 692.35$$

$$F4 := \frac{1}{2} (S2_{24} - S1_{11}) \cdot (T1_{24} - T4) = 90.887$$

$$F5 := \frac{1}{2} \cdot (S2_{24} - S1_{11}) \cdot (T1_{24} - T1_{11}) = 437.062$$

$$F6 := (S2_{24} - S1_{11}) \cdot T1_{11} = 1.031 \times 10^4$$

$$Ldl := (F3 + F4) - (F5) = 346.175$$

$$Lpol := Lad + Ldl = 4.263 \times 10^4$$

$$Ltr := F5 + F6 = 1.0752 \times 10^4$$

$$Le := Lad + Ldl + Ltr = 5.3382 \times 10^4$$

$$\eta_{ad} := \frac{Lad}{Le} \cdot 100 = 79.21$$

$$\eta_i := \frac{Lpol}{Le} \cdot 100 = 79.859$$

$$n := \frac{Lpol}{Lpol - R \cdot (T1_{24} - T1_{11})} = 1.423$$

Розрахунок добових значень показника політропи нагнітача ЦН 650-22-2

$i := 0..23$

$P_{vs_i} :=$	$P_{nag_i} :=$
$5.48 \cdot 10^6$	$6.95 \cdot 10^6$
$5.48 \cdot 10^6$	$6.97 \cdot 10^6$
$5.48 \cdot 10^6$	$6.97 \cdot 10^6$
$5.49 \cdot 10^6$	$6.98 \cdot 10^6$
$5.49 \cdot 10^6$	$6.99 \cdot 10^6$
$5.49 \cdot 10^6$	$6.99 \cdot 10^6$
$5.49 \cdot 10^6$	$6.99 \cdot 10^6$
$5.5 \cdot 10^6$	$6.99 \cdot 10^6$
$5.53 \cdot 10^6$	$7.02 \cdot 10^6$
$5.53 \cdot 10^6$	$7.04 \cdot 10^6$
$5.51 \cdot 10^6$	$7.02 \cdot 10^6$
$5.49 \cdot 10^6$	$7.00 \cdot 10^6$
$5.47 \cdot 10^6$	$6.98 \cdot 10^6$
$5.45 \cdot 10^6$	$6.95 \cdot 10^6$
$5.44 \cdot 10^6$	$6.93 \cdot 10^6$
$5.42 \cdot 10^6$	$6.91 \cdot 10^6$
$5.41 \cdot 10^6$	$6.90 \cdot 10^6$
$5.40 \cdot 10^6$	$6.89 \cdot 10^6$
$5.39 \cdot 10^6$	$6.88 \cdot 10^6$
$5.39 \cdot 10^6$	$6.87 \cdot 10^6$
$5.38 \cdot 10^6$	$6.86 \cdot 10^6$
$5.38 \cdot 10^6$	$6.86 \cdot 10^6$
$5.41 \cdot 10^6$	$6.88 \cdot 10^6$
$5.43 \cdot 10^6$	$6.9 \cdot 10^6$

$T_{norm} := 273$

$T_{st} := 293$

$T_{vs} := 293$

$T_n := 316$

$\rho_{пов} := 1.204$

$$k := \frac{C_p}{C_v} = 1.31$$

$$S1 := C_v \cdot \ln \left[\frac{(T_{vs})^k}{(P_{vs})^{k-1}} \right] =$$

	0
0	4.279·10 ³
1	4.279·10 ³
2	4.279·10 ³
3	4.278·10 ³
4	4.278·10 ³
5	4.278·10 ³
6	4.278·10 ³
7	4.277·10 ³
8	4.275·10 ³
9	4.275·10 ³
10	4.276·10 ³
11	4.278·10 ³
12	4.28·10 ³
13	4.282·10 ³
14	4.283·10 ³
15	4.285·10 ³
16	4.286·10 ³
17	4.287·10 ³
18	4.288·10 ³
19	4.288·10 ³
20	4.288·10 ³
21	4.288·10 ³
22	4.286·10 ³
23	4.284·10 ³

$$S2_{vs} := C_v \cdot \ln \left[\frac{T_{vs}^k}{(P_{nag})^{k-1}} \right] =$$

	0
0	4.159·10 ³
1	4.158·10 ³
2	4.158·10 ³
3	4.157·10 ³
4	4.156·10 ³
5	4.156·10 ³
6	4.156·10 ³
7	4.156·10 ³
8	4.154·10 ³
9	4.153·10 ³
10	4.154·10 ³
11	4.155·10 ³
12	4.157·10 ³
13	4.159·10 ³
14	4.161·10 ³
15	4.162·10 ³
16	4.163·10 ³
17	4.163·10 ³
18	4.164·10 ³
19	4.165·10 ³
20	4.166·10 ³
21	4.166·10 ³
22	4.164·10 ³
23	4.163·10 ³

$$S2n := Cv \cdot \ln \left[\frac{T_n^k}{(Pnag)^{k-1}} \right] =$$

	0
0	4.328·10 ³
1	4.326·10 ³
2	4.326·10 ³
3	4.326·10 ³
4	4.325·10 ³
5	4.325·10 ³
6	4.325·10 ³
7	4.325·10 ³
8	4.323·10 ³
9	4.321·10 ³
10	4.323·10 ³
11	4.324·10 ³
12	4.326·10 ³
13	4.328·10 ³
14	4.329·10 ³
15	4.331·10 ³
16	4.331·10 ³
17	4.332·10 ³
18	4.333·10 ³
19	4.334·10 ³
20	4.334·10 ³
21	4.334·10 ³
22	4.333·10 ³
23	4.331·10 ³

$$Tnad := \left[e^{\frac{(S1)}{Cv} \cdot (Pnag)^{k-1}} \right]^{\frac{1}{k}}$$

	0
0	308.892
1	309.103
2	309.103
3	309.074
4	309.179
5	309.179
6	309.179
7	309.046
8	308.961
9	309.169
10	309.226
Tnad = 11	309.283
12	309.341
13	309.294
14	309.217
15	309.276
16	309.305
17	309.334
18	309.363
19	309.257
20	309.286
21	309.286
22	309.092
23	309.035

$$F1 := \frac{\text{---}}{\text{---}} \rightarrow [(S1) - (S2vs)] \cdot Tvs =$$

	0
0	$3.506 \cdot 10^4$
1	$3.548 \cdot 10^4$
2	$3.548 \cdot 10^4$
3	$3.542 \cdot 10^4$
4	$3.563 \cdot 10^4$
5	$3.563 \cdot 10^4$
6	$3.563 \cdot 10^4$
7	$3.536 \cdot 10^4$
8	$3.519 \cdot 10^4$
9	$3.561 \cdot 10^4$
10	$3.573 \cdot 10^4$
11	$3.584 \cdot 10^4$
12	$3.596 \cdot 10^4$
13	$3.587 \cdot 10^4$
14	$3.571 \cdot 10^4$
15	$3.583 \cdot 10^4$
16	$3.589 \cdot 10^4$
17	$3.595 \cdot 10^4$
18	$3.6 \cdot 10^4$
19	$3.579 \cdot 10^4$
20	$3.585 \cdot 10^4$
21	$3.585 \cdot 10^4$
22	$3.546 \cdot 10^4$
23	$3.534 \cdot 10^4$

$$F2 := \left[\frac{1}{2} \cdot (S1 - S2vs) \cdot (Tnad - Tvs) \right] =$$

	0
0	1.014·10 ³
1	1.039·10 ³
2	1.039·10 ³
3	1.036·10 ³
4	1.048·10 ³
5	1.048·10 ³
6	1.048·10 ³
7	1.032·10 ³
8	1.022·10 ³
9	1.047·10 ³
10	1.054·10 ³
11	1.061·10 ³
12	1.068·10 ³
13	1.062·10 ³
14	1.053·10 ³
15	1.06·10 ³
16	1.063·10 ³
17	1.067·10 ³
18	1.07·10 ³
19	1.058·10 ³
20	1.061·10 ³
21	1.061·10 ³
22	1.038·10 ³
23	1.031·10 ³

$$Lad := (F1 + F2) =$$

	0
0	3.607·10 ⁴
1	3.652·10 ⁴
2	3.652·10 ⁴
3	3.646·10 ⁴
4	3.668·10 ⁴
5	3.668·10 ⁴
6	3.668·10 ⁴
7	3.64·10 ⁴
8	3.622·10 ⁴
9	3.666·10 ⁴
10	3.678·10 ⁴
11	3.69·10 ⁴
12	3.703·10 ⁴
13	3.693·10 ⁴
14	3.676·10 ⁴
15	3.689·10 ⁴
16	3.695·10 ⁴
17	3.701·10 ⁴
18	3.708·10 ⁴
19	3.685·10 ⁴
20	3.691·10 ⁴
21	3.691·10 ⁴
22	3.65·10 ⁴
23	3.637·10 ⁴

$$F3 := [(S2n - S1) \cdot Tnad] =$$

	0
0	$1.5 \cdot 10^4$
1	$1.456 \cdot 10^4$
2	$1.456 \cdot 10^4$
3	$1.462 \cdot 10^4$
4	$1.44 \cdot 10^4$
5	$1.44 \cdot 10^4$
6	$1.44 \cdot 10^4$
7	$1.468 \cdot 10^4$
8	$1.486 \cdot 10^4$
9	$1.442 \cdot 10^4$
10	$1.43 \cdot 10^4$
11	$1.418 \cdot 10^4$
12	$1.406 \cdot 10^4$
13	$1.416 \cdot 10^4$
14	$1.432 \cdot 10^4$
15	$1.42 \cdot 10^4$
16	$1.414 \cdot 10^4$
17	$1.408 \cdot 10^4$
18	$1.402 \cdot 10^4$
19	$1.424 \cdot 10^4$
20	$1.418 \cdot 10^4$
21	$1.418 \cdot 10^4$
22	$1.458 \cdot 10^4$
23	$1.47 \cdot 10^4$

$$F4 := \left[(S2n - S1) \cdot (Tn - Tnad) \cdot \frac{1}{2} \right] =$$

	0
0	172.58
1	162.471
2	162.471
3	163.823
4	158.879
5	158.879
6	158.879
7	165.177
8	169.244
9	159.332
10	156.672
11	154.017
12	151.367
13	153.531
14	157.073
15	154.382
16	153.038
17	151.696
18	150.355
19	155.245
20	153.891
21	153.891
22	162.958
23	165.702

$$F5 := \left[\frac{1}{2} \cdot (S2n - S1) \cdot (Tn - Tvs) \right] =$$

	0
0	582.746
1	565.325
2	565.325
3	567.686
4	559.007
5	559.007
6	559.007
7	570.04
8	577.054
9	559.807
10	555.089
11	550.341
12	545.561
13	549.467
14	555.804
15	550.996
16	548.58
17	546.156
18	543.724
19	552.542
20	550.115
21	550.115
22	566.177
23	570.95

$$F6 := [(S2n - S1) \cdot Tvs] =$$

	0
0	1.418·10 ⁴
1	1.376·10 ⁴
2	1.376·10 ⁴
3	1.381·10 ⁴
4	1.36·10 ⁴
5	1.36·10 ⁴
6	1.36·10 ⁴
7	1.387·10 ⁴
8	1.404·10 ⁴
9	1.362·10 ⁴
10	1.351·10 ⁴
11	1.339·10 ⁴
12	1.328·10 ⁴
13	1.337·10 ⁴
14	1.352·10 ⁴
15	1.341·10 ⁴
16	1.335·10 ⁴
17	1.329·10 ⁴
18	1.323·10 ⁴
19	1.345·10 ⁴
20	1.339·10 ⁴
21	1.339·10 ⁴
22	1.378·10 ⁴
23	1.389·10 ⁴

$$Ldl := [(F3 + F4) - (F5 + F6)] =$$

	0
0	410.166
1	402.855
2	402.855
3	403.863
4	400.128
5	400.128
6	400.128
7	404.863
8	407.811
9	400.476
10	398.418
11	396.324
12	394.194
13	395.936
14	398.731
15	396.614
16	395.542
17	394.46
18	393.369
19	397.297
20	396.224
21	396.224
22	403.219
23	405.248

$$Lpol := (Lad + Ldl) =$$

	0
0	$3.648 \cdot 10^4$
1	$3.692 \cdot 10^4$
2	$3.692 \cdot 10^4$
3	$3.686 \cdot 10^4$
4	$3.708 \cdot 10^4$
5	$3.708 \cdot 10^4$
6	$3.708 \cdot 10^4$
7	$3.68 \cdot 10^4$
8	$3.662 \cdot 10^4$
9	$3.706 \cdot 10^4$
10	$3.718 \cdot 10^4$
11	$3.73 \cdot 10^4$
12	$3.742 \cdot 10^4$
13	$3.732 \cdot 10^4$
14	$3.716 \cdot 10^4$
15	$3.728 \cdot 10^4$
16	$3.735 \cdot 10^4$
17	$3.741 \cdot 10^4$
18	$3.747 \cdot 10^4$
19	$3.725 \cdot 10^4$
20	$3.731 \cdot 10^4$
21	$3.731 \cdot 10^4$
22	$3.69 \cdot 10^4$
23	$3.678 \cdot 10^4$

	0
0	$1.476 \cdot 10^4$
1	$1.432 \cdot 10^4$
2	$1.432 \cdot 10^4$
3	$1.438 \cdot 10^4$
4	$1.416 \cdot 10^4$
5	$1.416 \cdot 10^4$
6	$1.416 \cdot 10^4$
7	$1.444 \cdot 10^4$
8	$1.462 \cdot 10^4$
9	$1.418 \cdot 10^4$
10	$1.406 \cdot 10^4$
Ltr := F5 + F6 =	11 $1.394 \cdot 10^4$
	12 $1.382 \cdot 10^4$
	13 $1.392 \cdot 10^4$
	14 $1.408 \cdot 10^4$
	15 $1.396 \cdot 10^4$
	16 $1.39 \cdot 10^4$
	17 $1.384 \cdot 10^4$
	18 $1.377 \cdot 10^4$
	19 $1.4 \cdot 10^4$
	20 $1.394 \cdot 10^4$
	21 $1.394 \cdot 10^4$
	22 $1.434 \cdot 10^4$
	23 $1.446 \cdot 10^4$

	0
0	$5.124 \cdot 10^4$
1	$5.124 \cdot 10^4$
2	$5.124 \cdot 10^4$
3	$5.124 \cdot 10^4$
4	$5.124 \cdot 10^4$
5	$5.124 \cdot 10^4$
6	$5.124 \cdot 10^4$
7	$5.124 \cdot 10^4$
8	$5.124 \cdot 10^4$
9	$5.124 \cdot 10^4$
10	$5.124 \cdot 10^4$
Le := (Lad + Ldl + Ltr) =	11 $5.124 \cdot 10^4$
	12 $5.124 \cdot 10^4$
	13 $5.124 \cdot 10^4$
	14 $5.124 \cdot 10^4$
	15 $5.124 \cdot 10^4$
	16 $5.124 \cdot 10^4$
	17 $5.124 \cdot 10^4$
	18 $5.124 \cdot 10^4$
	19 $5.124 \cdot 10^4$
	20 $5.124 \cdot 10^4$
	21 $5.124 \cdot 10^4$
	22 $5.124 \cdot 10^4$
	23 $5.124 \cdot 10^4$

$$\eta_{ad} := \overrightarrow{\left(\frac{L_{ad}}{L_e} \cdot 100 \right)} =$$

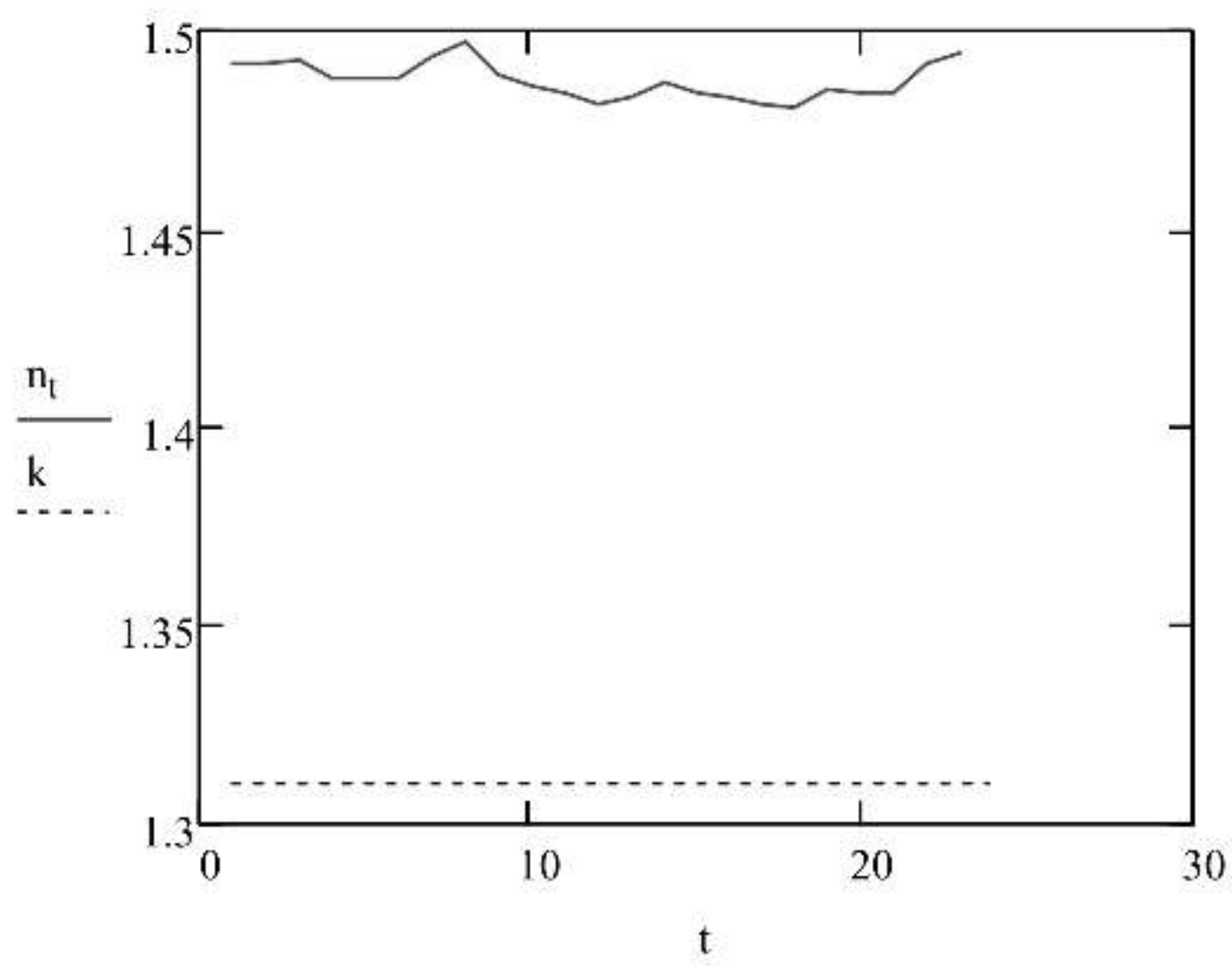
	0
0	70.39
1	71.265
2	71.265
3	71.147
4	71.583
5	71.583
6	71.583
7	71.028
8	70.676
9	71.543
10	71.78
11	72.019
12	72.26
13	72.063
14	71.744
15	71.986
16	72.108
17	72.23
18	72.352
19	71.908
20	72.03
21	72.03
22	71.223
23	70.983

$$\eta_i := \overrightarrow{\left(\frac{L_{pol}}{L_e} \cdot 100 \right)} =$$

	0
0	71.19
1	72.052
2	72.052
3	71.935
4	72.364
5	72.364
6	72.364
7	71.818
8	71.472
9	72.324
10	72.558
11	72.792
12	73.029
13	72.836
14	72.522
15	72.76
16	72.88
17	72.999
18	73.12
19	72.684
20	72.804
21	72.804
22	72.009
23	71.773

	0
0	1.5
1	1.491
2	1.491
3	1.493
4	1.488
5	1.488
6	1.488
7	1.494
8	1.497
9	1.489
10	1.486
11	1.484
12	1.482
13	1.483
14	1.487
15	1.484
16	1.483
17	1.482
18	1.481
19	1.485
20	1.484
21	1.484
22	1.492
23	1.494

$$n := \frac{L_{pol}}{L_{pol} - R \cdot (T_n - T_{vs})} =$$



Тепловий розрахунок рекуперативного теплообмінника

$$\frac{H1}{\text{www}} := \frac{C_{H4} \cdot 39.82 + C_{C2H6} \cdot 70.31 + C_{C3H8} \cdot 101.21 + C_{C4H10} \cdot 133.4 + C_{C5H12} \cdot 169.3 + C_{C6H14} \cdot 187.4}{100} = 41.115$$

$$t11 := 21$$

$$t12 := 37$$

$$t21 := 46$$

$$t22 := 40$$

$$\lambda := 50$$

$$G1 := \frac{10800}{3600} = 3$$

$$\eta := 0.97$$

$$p1 := 53.5$$

$$p2 := 71$$

$$P1 := p1 \cdot 98066.5 = 5.247 \times 10^6$$

$$P2 := p2 \cdot 98066.5 = 6.963 \times 10^6$$

$$Q1 := G1 \cdot Cp \cdot (t12 - t11) = 1.025 \times 10^5$$

$$t1 := \frac{t11 + t12}{2} = 29$$

$$t2 := \frac{t21 + t22}{2} = 43$$

$$z1 := 1 - 5.39 \cdot 10^5 \cdot \frac{p1 \cdot \Delta^{1.3}}{(t1 + 273)^{3.3}} = 0.906$$

$$\rho1 := \rho_{st} \cdot \frac{P1 \cdot T_{st}}{z1 \cdot (t1 + 273) \cdot P_{st}} = 38.939$$

$$\lambda1 := 39.31 \cdot 10^{-3} = 0.039$$

$$Pr1 := 0.79$$

$$\mu1 := 12.06 \cdot 10^{-6}$$

$$v1 := \frac{\mu1}{\rho1} = 3.097 \times 10^{-7}$$

$$t_{st} := \frac{t1 + t2}{2} = 36$$

$$Pr1_{st} := 0.78$$

$$d1 := 16 \cdot 10^{-3}$$

$$n1 := 32$$

$$\text{dekv} := \left[\left[(d1)^{2.6} \right] \cdot n1 \right]^{\frac{1}{2.6}} = 0.148$$

$$v1 := \frac{G1}{\rho1 \cdot \left[\frac{3.14 \cdot (\text{dekv})^2}{4} \right]} = 4.503$$

$$\text{Re1} := \frac{v1 \cdot \text{dekv} \cdot \rho1}{\mu1} = 2.146 \times 10^6$$

$$\varepsilon1 := 1$$

$$\text{Nu1} := 0.021 \cdot \text{Re1}^{0.8} \cdot \text{Pr1}^{0.43} \cdot \left(\frac{\text{Pr1}}{\text{Pr1st}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon1 = 2.215 \times 10^3$$

$$\alpha1 := \text{Nu1} \cdot \frac{\lambda1}{\text{dekv}} = 589.764$$

$$z2 := 1 - 5.39 \cdot 10^5 \cdot \frac{p2 \cdot \Delta^{1.3}}{(t2 + 273)^{3.3}} = 0.893$$

$$\rho2 := \rho_{st} \cdot \frac{P2 \cdot T_{st}}{z2 \cdot (t2 + 273) \cdot P_{st}} = 50.126$$

$$\lambda2 := 42.57 \cdot 10^{-3} = 0.043$$

$$\text{Pr2} := 0.802$$

$$\mu2 := 12.87 \cdot 10^{-6}$$

$$v2 := \frac{\mu2}{\rho2} = 2.568 \times 10^{-7}$$

$$\text{Pr2st} := 0.812$$

$$d2 := 800 \cdot 10^{-3}$$

$$d11 := 20 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{dekv2} := \left[\left[(d11)^{2.6} \right] \cdot n1 \right]^{\frac{1}{2.6}} = 0.185$$

$$S_{\text{w}} := \frac{3.14}{4} \cdot \left[(d2)^2 - 2 \cdot (\text{dekv2}^2) \right] = 0.449$$

$$\chi := 3.14 \cdot [d2 + [2 \cdot (\text{dekv2})]] = 3.671$$

$$R_{\text{w}} := \frac{S}{\chi} = 0.122$$

$$v_2 := \frac{G_2}{\rho_2 \cdot \left[\frac{3.14 \cdot (4 \cdot R)^2}{4} \right]} = 0.876$$

$$Re_2 := \frac{v_2 \cdot (4 \cdot R) \cdot \rho_2}{\mu_2} = 1.669 \times 10^6$$

$$\varepsilon_2 := 1.29 \epsilon$$

$$Nu_2 := 0.021 \cdot Re_2^{0.8} \cdot Pr_2^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2st}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_2 = 2.345 \times 10^3$$

$$\alpha_2 := Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{4R} = 204.102$$

$$\delta_{\text{mm}} := \frac{d_{11} - d_1}{2} = 2 \times 10^{-3}$$

$$k_1 := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = 150.714$$

$$P := \frac{t_{12} - t_{11}}{t_{21} - t_{11}} = 0.64$$

$$R_1 := \frac{t_{21} - t_{22}}{t_{12} - t_{11}} = 0.375$$

$$\Delta T_b := t_{22} - t_{11} = 19$$

$$\Delta T_m := t_{21} - t_{12} = 9$$

$$\Delta t_p := \frac{(\Delta T_b) - (\Delta T_m)}{\ln\left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_m}\right)} = 13.383$$

$$\Delta t := \Delta t_p \cdot 0.92 = 12.312$$

$$t_{st1} := t_1 + \frac{k_1 \cdot \Delta t}{\alpha_1} = 32.146$$

$$t_{st2} := t_2 - \frac{k_1 \cdot \Delta t}{\alpha_2} = 33.908$$

$$t_{srst} := 0.5 \cdot (t_{st1} + t_{st2}) = 33.027$$

$$Pr_{1stsr} := 0.78 \epsilon$$

$$Nu_{11} := 0.021 \cdot Re_1^{0.8} \cdot Pr_1^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{1stsr}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_1 = 2.212 \times 10^3$$

$$\alpha_{11} := Nu_{11} \cdot \frac{\lambda_{11}}{d_{kv}} = 589.015$$

$$Pr_{2stsr} := 0.81 \epsilon$$

$$Nu_{22} := 0.021 \cdot Re_2^{0.8} \cdot Pr_2^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2stsr}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_2 = 2.342 \times 10^3$$

$$\alpha_{22} := Nu_{22} \cdot \frac{\lambda_{22}}{d_{kv}} = 589.015$$

$$t_{srst} := 0.5 \cdot (t_{st1} + t_{st2}) = 33.027$$

$$k_{rel} := \frac{G1 \cdot Cp \cdot (t12 - t11)}{\Delta t \cdot F12} = 66.048$$

i := 0..9

G1 :=

1620
3240
4860
6480
8100
9720
11340
12960
14580
16200

$$T_{ww} := \frac{G2 \cdot Cp \cdot (t21 - 45)}{\frac{G1}{3600} \cdot Cp} + t11 =$$

	0
0	39.328
1	30.164
2	27.109
3	25.582
4	24.666
5	24.055
6	23.618
7	23.291
8	23.036
9	22.833

