

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет інженерних систем і екології
Кафедра теплотехніки**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М.А. Кириченко

« _____ » _____ 2023р.

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

**Модернізація енергетичного парогенератора для роботи на збагаченому
киснем дугтьовому повітрі**

Виконала: студентка групи ТЕМ-22
Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»
Освітня програма: «Енергетичний
менеджмент, енергоефективні
муніципальні та промислові теплові
технології»

Кишман Катерина Андріївна

Науковий керівник:
Гламаздин Павло Михайлович

Рецензент:
Швачко Наталія Анатоліївна

Київ 2023р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Інженерних систем та екології
Кафедра: Теплотехніки
Освітній рівень: «магістр за ОПП»
Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»
Спеціалізація: «Енергетичний менеджмент, енергоефективні муніципальні та промислові теплові технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ М.А. Кириченко
« ____ » _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Кишман Катерина Андріївна

1. Тема роботи: «Модернізація енергетичного парогенератора для роботи на збагаченому киснем дуттьовому повітрі»
затверджена наказом ректора КНУБА № 2676/2 від 09.11.2023 р.
2. Керівник роботи: доцент кафедри теплотехніки Гламаздин Павло Михайлович.
3. Строк подання студентом роботи до захисту: 27 грудня 2023 р.
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
Розділ 1. Літературний огляд.
Розділ 2. Котельний агрегат ТП-87.
Розділ 3. Позонний розрахунок топки.
Розділ 4. Результати розрахунків топки.
Розділ 5. Установка мембранного розділення повітря.
Розділ 6. Розрахунок викидів СО та NOx.
Розділ 7. Аналіз отриманих результатів.
5. Перелік графічного матеріалу:
 1. Методи зниження шкідливих викидів.
 2. Поздовжній розріз котельного агрегату ТП-87.
 3. Установка для мембранного розділення повітря.
 4. Результати розрахунків складу та об'єму продуктів згоряння.
 5. Результати теплового розрахунку топки.

6. Результати позонного розрахунку теплообміну в топці.
7. Викиди CO та NOx.
8. Схема подачі збагаченого киснем дуттьового повітря в камеру згоряння.
9. Схема подачі збагаченого киснем дуттьового повітря в камеру охолодження.
10. Висновки.

6. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Вступ	09/11 – 10/11
Літературний огляд	10/11 – 15/11
Котельний агрегат ТП-87	15/11 – 16/11
Позонний розрахунок топки	16/11 – 17/11
Результати розрахунків топки	17/11 – 08/12
Установка мембранного розділення повітря	08/12 – 09/12
Розрахунок викидів CO та NOx	10/12 – 12/12
Аналіз отриманих результатів	13/12 – 14/12
Висновки	15/12 – 16/12
Остаточне оформлення роботи	17/12 – 23/12
Направлення роботи на перевірку на плагіат	26/12

7. Дата видачі завдання: 09 грудня 2023р.

Зав. кафедри _____ Кириченко М.А.

Керівник _____ Гламаздін П. М.

Студентка _____ Кишман К.А.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Літературний огляд.....	8
2. Котельний агрегат ТП-87.....	13
3. Позонний розрахунок топки.....	23
4. Результати розрахунків топки:.....	24
4.1. Базовий розрахунок.....	24
4.1.1. Об'єми і ентальпії продуктів згорання.....	24
4.1.2. Тепловий розрахунок котельного агрегату.....	26
4.1.3. Позонний розрахунок топкової камери.....	32
4.2. Збагачення киснем дуттьового повітря.....	45
4.2.1. Об'єми і ентальпії продуктів згорання.....	45
4.2.2. Тепловий розрахунок котельного агрегату.....	51
4.2.3. Позонний розрахунок топкової камери.....	51
4.3. Двоступенева схема спалювання.....	53
4.3.1. Об'єми і ентальпії продуктів згорання.....	53
4.3.2. Тепловий розрахунок котельного агрегату.....	54
4.3.3. Позонний розрахунок топкової камери.....	54
5. Установка для мембранного розділення повітря.....	56
6. Розрахунок викидів СО та NO _x	58
6.1. Перерахунок характеристик газоподібного палива.....	58
6.2. Визначення об'єму сухих димових газів.....	59
6.3. Розрахунок валових викидів СО та NO _x	62
7. Аналіз отриманих результатів.....	64
Висновки	69
Перелік використаних інформаційних джерел.....	71
Додатки.....	75

ВСТУП

У сучасному світі велика увага приділяється стану навколишнього середовища та його захисту від негативного антропогенного впливу. Одним із важливих факторів, що характеризують навколишнє середовище, є якість атмосферного повітря.

Під час спалювання органічного палива в енергетичних установках у атмосферне повітря разом з димовими газами ТЕС викидають в атмосферу цілу низку шкідливих речовин.

Кабінет Міністрів України розпорядженням від 08.11.2017 № 796-р схвалив Національний план скорочення викидів (НПСВ) забруднюючих речовин від великих спалювальних установок [1]. Це дозволило Україні як Договірній Стороні Енергетичного Співтовариства відтермінувати виконання вимог Додатку II стосовно обмеження викидів деяких забруднюючих речовин на великих спалювальних установках (ВСУ) Договору про заснування Енергетичного Співтовариства [2]. Протягом дії НПСВ з 01.01.2018 до 01.01.2034 існуючі ВСУ номінальною тепловою потужністю не менше 50 МВт, які включені до НПСВ, повинні зменшити викиди забруднюючих речовин шляхом спорудження сучасних систем очищення димових газів, при цьому має забезпечуватися щорічне загальнонаціональне лінійне зниження валових викидів забруднюючих речовин. По завершенні строку дії НПСВ концентрації забруднюючих речовин в димових газах ВСУ мають відповідати вимогам європейської Директиви 2010/75/EU про промислові викиди [3].

Кожній спалювальній установці, яка включена до НПСВ, встановлено щорічні граничні значення валового викиду SO_2 , NO_x та пилу – 200 мг/нм³ для SO_2 та NO_x і 20 мг/нм³ для пилу [3].

Структура НПСВ базувалась на керівництві Секретаріату Енергетичного співтовариства [4] та відповідних рішеннях Європейського Союзу.

Україна як Сторона Угоди про утворення Енергетичного співтовариства виконала свої зобов'язання щодо зниження валових забруднюючих речовин викидів за 2018 і 2019 р. згідно Національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. При існуючих обсягах викидів забруднюючих речовин Україна зможе виконувати свої зобов'язання згідно НПСВ до 2024 р. навіть без спорудження нового газоочисного обладнання на ВСУ. З початку дії НПСВ на жодній з ВСУ України не розпочато проектування сіркоочисної або азотоочисної установки, а для їх встановлення на енергоблоках, що входять до НПСВ, потрібно не менше 14 років. Тому автори дослідження [5] вважають, що раціональною пропозицією є подовження строку закінчення НПСВ до кінця 2038 р.

В свою чергу, в даній роботі я пропоную розглянути методи зниження викидів шкідливих речовин на стадії спалювання палива в топках енергетичних парогенераторів.

Встановлено, що кількість утворюваних в топковій камері шкідливих речовин залежить від режимних умов і конструктивних параметрів. Таким чином, є можливість впливати на процес і якщо не виключити повністю, то звести до мінімуму шкоду, що завдається навколишньому середовищу апаратами, які спалюють органічне паливо.

Найбільшу шкоду навколишньому середовищу при спалюванні на ТЕС природного газу завдають оксиди азоту. Крім того, при неповному згоранні палива в димових газах містяться оксиди вуглецю (CO) [6].

Джерелом утворення оксидів азоту, як відомо, є азот, вміст якого в атмосферному повітрі може сягати 79-80 %. Усунувши із цієї газової суміші (атмосферного повітря) хоча б частину азоту можна пропорційно зменшити кількість атмосферних оксидів азоту. Відповідно, організувавши багатоступеневе спалювання палива, суміщаючи його із підвищенням вмісту окислювача в атмосферному повітрі понад звичну його частку, можна очікувати підвищення температури в зоні горіння та кількості тепла, яка передається

робочому тілу. Це сприяє підвищенню ефективності процесів спалювання та зменшенню частки неповністю спаленого палива, якого значно меншу кількість потрібно буде подати на початковій стадії технологічного процесу. Такий перехід до "кисневого спалювання" неминуче призведе до відповідного зменшення масової витрати газової суміші, яка надходить на відповідну ступінь спалювання, а також відхідних (димових) газів [7].

Окислювачем під час спалювання органічного палива замість атмосферного повітря може бути збагачена киснем газова суміш. Збагачення дуттьового повітря киснем у процесах горіння відомо понад 150 років від патенту Бессемера щодо збагачення доменного дуття киснем та активно використовується в металургії з початку ХХ століття [8]. Однак в інших галузях техніки, у тому числі в енергетиці, цей метод інтенсифікації горіння не знаходив до останнього часу широкого застосування через високу вартість кисню, що отримувався методом криогенного розділення повітря. Лише в останні десятиріччя положення змінилося у зв'язку з розвитком нових методів отримання кисню – адсорбційного методу [9] і методу мембранного розділення [10]. Вартість отримання кисню цими методами вже дає змогу розглядати можливість впровадження в теплогенеруючих установках.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Вивчення процесів змішування, реакції активних речовин, а також хімічних реакцій, що їх супроводжують, є основою для управління, пізнання процесів горіння і утворення токсичних речовин, зокрема оксидів азоту. Однак існує ряд проблем, до яких належить недостатня вивченість цих процесів, оскільки вони мають швидкоплинність і складність. Відомо, що реакція згорання вуглеводневих палив відноситься до типу ланцюгових реакцій з розгалуженими ланцюгами. На характер протікання процесу впливають різні фактори, такі як: тиск, температура, швидкість, ступень змішування палива з повітрям і інші.

Реакція окислення (горіння) може призвести до утворення перекисів, тобто до стійких активних проміжних продуктів окислення, які піддаються розпаду, утворюючи формальдегід.

Активні проміжні продукти окислення періодично розпадаються, виділяючи вільні радикали, що дають початок нової гілки ланцюгів. Даний процес набуває лавиноподібного характеру. В цьому процесі утворюються активні радикали, що викликають розпад перекису і оксиду вуглецю [11].

Тоді послідовність реакції окислення вуглеводнів можна представити таким чином: спочатку утворюється деяка кількість активних радикалів, що вступають в реакцію з киснем, потім з'являються активні перекиси, які перетворюються в молекули перекису водню. Після утворення активного радикала перекису реакція окислення може розвиватися у відповідності із порядком відтворення перекису або радикалів. Характер розвитку залежить від моменту появи радикала [12].

У процесі горіння з високою температурою, азот, який знаходиться в повітрі стає реакційно здатним і утворює такі оксиди як NO, NO₂, N₂O₃, N₂O₄ та інші. У продуктах згорання в основному мають місце NO, NO₂ які часто об'єднуються в NO_x. Створення оксидів азоту можливо в декількох випадках: перший випадок - це азот, що утворився з молекулярного азоту повітря; другий - через проміжні радикали при високій швидкості («швидким»); третій випадок -

азот знаходиться в складі палива, так званий паливний азот. Таким чином ми маємо три види утворень азоту - термічний, швидкий і паливний [13].

Термічні оксиди азоту NO_x

Головним фактором, що визначає утворення термічного азоту, є температура в зоні горіння. З підвищенням температури полум'я - утворення NO_x експоненціально зростає. Тому для зменшення виходу оксидів азоту в першу чергу необхідно знизити температуру в зоні горіння і перш за все виключити локальний закид температури.

Атомарний кисень утворюється в факелі не тільки за рахунок дисоціації O₂, але й в інших реакціях, враховуючи факт того, що концентрація кисню в зоні горіння в кілька разів більше, ніж середня розрахункова по об'єму топки [13].

«Швидкі» оксиди азоту

Вважається, що швидке утворення оксидів азоту відбувається у фронті полум'я. При хімічних реакціях, за участі вуглеводних радикалів і азоту з атмосферного повітря, виникають азотовмісні радикали, які потім окислюються до NO_x.

Цей механізм значно обмежує можливість зниження NO в процесах спалювання палив.

Паливний азот

Паливний азот - це оксиди азоту, в основній своїй частині утворюються при згорянні твердих і рідких палив, до складу яких входять різні сполуки азоту (CNH, CN, NH₃, NH₂, NH) або при наявності в газоподібному паливі аміаку. Швидкість утворення такого роду азоту у меншій мірі залежить від температури.

Діоксид азоту

Оксид азоту, який є продуктом початкового окислення азоту, окислюється до діоксиду, при досягненні необхідної для протікання даної екзотермічної реакції, низької температури.

Вважається, що з двох найімовірніших окислювачів NO в NO₂, якими є атомарний кисень і радикал HO₂, значення має тільки HO₂. Це пов'язане з тим, що процес окислення NO в NO₂ у полум'ї молекулярним киснем має високу енергію активації реакцій і великий час реагування, тому даний процес не може дати істотних кількостей NO₂. Радикал утворюється в значних кількостях в факелах вуглеводневих палив в зоні загибелі атомарного водню і в області мінімальних температур. В зоні горіння, при змісті NO в продуктах згорання 100-120 мг/м³, можна вважати, що при наявності HO₂, NO практично миттєво переходить в NO₂ і тільки недостатня кількість HO₂ перешкоджає повному окисленню NO в NO₂ [14].

Оксиди вуглецю

Оксид вуглецю – це одна з дуже токсичних речовин, що потрапляють в атмосферне повітря.

CO утворюється у великій кількості за рахунок неповного згорання палива. Це може бути викликано низькою швидкістю окислення, внаслідок браку часу перебування в зоні горіння або недостатній кількості повітря повітря. Не якісне перемішування палива та повітря утворюють зони, де відбувається недопал палива, що призводить до високих концентрацій оксиду вуглецю.

Для зниження концентрацій CO може бути достатньо забезпечити повноту згорання палива та допалювання газів [14].

На сьогодні відомі декілька способів зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива. Здебільшого ці методи націлені на зменшення температури факела: рециркуляція продуктів згорання [15]; упорскування вологи у топку [16].

В даній роботі детальніше розглянемо такі методи зниження генерації CO та NO_x як спалювання з малими надлишками повітря, збагачення киснем дугтьового повітря та комбінація цих двох методів – двоступеневе спалювання палива.

Одним із режимних заходів, який найлегше реалізувати, є зниження надлишку повітря в топці. У результаті зменшення вмісту кисню в зоні горіння відбувається пригнічення утворення як термічних, так і паливних NOx. Тому цей захід може бути застосований під час спалювання будь-яких видів органічного палива. Він дає змогу не тільки знизити викиди NOx, а й дещо підвищити ККД котла завдяки зниженню втрат теплоти з відхідними газами і витрат енергії на власні потреби.

Результати експериментів досліджень [17, 18] показали: ще більший ефект зниження викидів оксидів азоту спостерігається при подальшому зниженні α аж до появи хімічного недопалу. Причому основне зниження емісії NOx відбувається вже за появи помірного недопалу палива, в даному випадку мазуту. Так, підвищення хімічного недопалу, що супроводжувалося зростанням концентрації CO в продуктах згорання (у контрольному перерізі) від 0 до 50 ppm ($62,5 \text{ мг/м}^3$), призводило до зниження вмісту оксидів азоту на 25 - 30%. У разі подальшого збільшення недопалу, коли вміст CO збільшувався з 50 ppm до нормативних значень (для мазуту – 300 мг/м^3 або 240 ppm), відбувалося додаткове лінійне зниження виходу NOx на 10 - 12% від початкового значення.

Однак, автори дослідження [17, 18] пропонують змиритися з появою деякої кількості оксидів вуглецю в продуктах згорання, оскільки його генерується в малій, як вони вважають, кількості і ефект зменшення генерування оксидів азоту переважає.

Проблемі використання кисню для збагачення дуттьового повітря в діючих теплогенеруючих установках присвячено декілька робіт. У дослідженнях [19-23] відмічається зниження витрати палива при збільшенні концентрації кисню в дуттьовому повітрі, при цьому незалежно від виду палива і типу котла залежності витрати палива від концентрації кисню подібні, вони експоненціальні. Графік підвищення ККД також збільшується експоненціально. В роботі [19] відмічено зростання температури точки роси димових газів при спалюванні природного газу від 58°C при концентрації кисню 21% до 86°C , відповідно, при спалюванні органічного палива в чистому кисні. У роботі [20]

отримано емпіричні дані роботи газового котла потужністю 5400 кВт при збагаченні дуттьового повітря киснем до 40%. При цьому отримано покращення екологічних характеристик котла. Вміст NOx у димових газах при спалюванні природного газу з використанням збагаченого киснем повітря становив 490 мг/м³, а при використанні атмосферного повітря як окисника вміст NOx становив 520 мг/м³. В роботах [21-23] проблема розглядається в загальному плані, у них констатується позитивний ефект від збагачення киснем дуттьового повітря й не розглядається конкретний вплив результату цього заходу на процеси в котлі. У більшості з них як паливо приймається до розгляду природний газ.

Метод збагачення дуттьового повітря киснем частіше розглядається тільки як метод підвищення енергоефективності енергетичних парогенераторів, але є і дослідження, де виявлено позитивний вплив на екологічні характеристики енергетичних установок.

Наприклад, у статтях [24, 25] автори зазначають, що збагачення дуттьового повітря киснем призводить до низки змін у роботі теплогенеруючих пристроїв. Змінюється склад середовища топки та його теплофізичні характеристики, що безпосередньо впливає на утворення шкідливостей у процесі горіння. Автори статей констатують, що збагачення киснем повітря, котре вдувається в топку, дає змогу значно зменшити надлишок повітря, а можливо навіть і відмовитися від нього.

Двоступеневе спалювання палива, де на першій стадії спалювання наявний коефіцієнт надлишку повітря, що менший за одиницю, а на другій – підвищується вміст окислювача в атмосферному повітрі понад стандартну його частку, призводить до підвищення температури в зоні горіння та кількості тепла, що поглинається екранами топки. Використання збагаченого киснем дуттьового повітря дозволяє уникнути появи оксидів вуглецю в продуктах згоряння, що утворились на першій стадії спалювання газу, натомість на другому ступені впроваджується вдування в топкову камеру збагаченого киснем повітря, яке в свою чергу, продовжує процес спалювання палива і виключає утворення хімічного недопалу шляхом доокиснення оксиду вуглецю CO в двоокис CO₂ [26].

2. КОТЕЛЬНИЙ АГРЕГАТ ТП-87

Котельний агрегат типу ТП-87, марка Е-420/140, барабанний з природною циркуляцією, призначений для одержання пари високого тиску під час спалювання в топці АШ, пісного вугілля, природного газу і розрахований на параметри, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 «Основні технічні характеристики котлоагрегату ТП-87»

Характеристика	Одиниці вимірювання	Величина
Тип котла	-	Е-420-14-560КГЖ (модель ТП-87)
Продуктивність	т/год	420
Тиск пари за котлом	МПа	14,0
Робочий тиск в барабані котла	МПа	15,5
Температура перегрітої пари	°С	560
Температура живильної води	°С	230
Основний вид палива	-	Природний газ
Температура димових газів	°С	160
Температура гарячого повітря	°С	400
ККД котла (брутто)	%	94

Котельний агрегат типу ТП-87 має П-подібне компоновання. Камера згоряння є висхідним газоходом. У горизонтальному газоході розташовується конвективний пароперегрівач, у низхідному газоході розташовані врозсічку водяний економайзер і трубчастий повітропідігрівач.

Топка

Топкова камера, на відміну від звичайних призматичних камер, у нижній частині має пережим, утворений гнутими всередину топкової камери трубами фронтального і заднього екранів. Частина цих труб, приблизно 50%, вигнута за профілем виступу без розвилки, а інша частина має розвилки в нижній і верхній частинах виступів.

Основна частина пароводяної суміші екранів рухається через труби, вигнуті за профілем, а невелика частина - через прямі ділянки, що несуть вагу

екранів. Необхідна для охолодження цих ділянок витрата пароводяної суміші забезпечується встановленням дроселів Ø5мм на початку прямих ділянок труб.

Глибина виступів пережиму - 1890 мм з кожного боку. Нижня частина топки є камерою горіння (передтопком). Вище пережиму розташована камера догоряння. Екранні труби Ø60×6, ст.20 із кроком 64 мм закривають повністю фронтальну, задню і бічні стіни камери згоряння і стіни топкової камери і, сходячись вниз, утворюють під топку з двома летками для видалення рідкого шлаку. Конструктивні та теплові параметри топкової камери наведено в таблиці 2.2.

Для кращого заповнення камери догоряння і кращого обтікання газами ширмового і стельового пароперегрівачів труби заднього екрана у верхній частині топки перед горизонтальним газоходом утворюють виступ у топку глибиною 2000 мм (аеродинамічний виступ, виконаний конструктивно на кшталт пережиму передтопку з дросельними шайбами Ø10 мм). На екранах встановлюються пояси жорсткості, які розміщені через кожні 3 метри по висоті топки й обмежують зміщення труб екранів у горизонтальній площині.

Камера згоряння обладнана 12-ма газомазутними пальниками. Пальники розташовані зустрічно на фронтальній і задній стінах топки на позначці 8,4 м по 6 штук.

Таблиця 2.2 «Конструктивні характеристики топкової камери котельного агрегату»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Топкова камера				
Діаметр і товщина екранних труб	$d \times \delta$	мм	По кресленню	60x6
Крок труб	s_1	мм	По кресленню	64
Камера згоряння	Поверхні: фронтальної стіни	F_ϕ	По кресленню $F_3 = F_\phi$ По кресленню По кресленню	$(7,47-1,8) \cdot 12,1 = 68,607$
	задньої стіни	F_3		$(7,47-1,8) \cdot 12,1 = 68,607$
	бічної стіни подоу і стелі	F_6 $F_{\text{под}} + F_{\text{пот.к.зг}}$		$5,67 \cdot 6,4 + 1,8 \cdot 3,2 = 42,048$ $(3,7+3,7) \cdot 12,1 + (1,7+1,7) \cdot 12,1 = 130,68$
Неекранована поверхня в області пальників	$F_{\text{гор}}$	м^2	По кресленню	12
Сумарна екранована поверхня камери згоряння	$F_{\text{ст.к.зг.}}$	м^2	$F_\phi + F_3 + 2F_6 + F_{\text{под}} + F_{\text{пот.к.зг}} - F_{\text{гор}}$	$68,607 + 68,607 + 2 \cdot 42,048 + 130,68 - 12 = 339,99$
Камера охолодження	Поверхні: стелі	$F_{\text{пот}}$	По кресленню	$4,3 \cdot 12,1 = 52,03$
	фронтальної стіни	F_ϕ		$(17+3,2) \cdot 12,1 = 244,42$
	задньої стіни	F_3		$(3,2+4,7+2) \cdot 12,1 = 119,79$
бічної стіни	F_6	$(3,2+4,7+2) \cdot 6,4 + 4,3 \cdot 11 = 110,66$		
вихідного вікна	$N_{\text{вых}}$		$(2,1+11) \cdot 12,1 = 158,51$	
Сумарна поверхня стін камери охолодження	$F_{\text{ст.отк}}$	м^2	$F_{\text{пот}} + F_\phi + F_3 + 2F_6 + N_{\text{вых}}$	$52,03 + 244,42 + 119,79 + 2 \cdot 110,66 + 158,51 = 796,07$
Сумарна поверхня стін топкової камери	$F_{\text{ст}}$	м^2	$F_{\text{ст.к.зг.}} + F_{\text{ст.отк}} + F_{\text{гор}}$	$339,99 + 796,07 + 12 = 1148,06$
Об'єм топкової камери (до ширм)	V_T	м^3	По кресленню	$12,1 \cdot (42,048 + 110,66) = 1847,767$
Ефективна товщина випромінюючого шару	s	м	$3,6 \frac{V_T}{F_{\text{ст}}}$	$3,6 \cdot \frac{1847,767}{1148,06} = 5,794$

Пароперегрівач

Пароперегрівач конструктивно виконаний зі стельового 1, ширмового 2 і чотирьох ступенів конвективного 3 пароперегрівачів (рис. 2.2.1). За характером теплосприйняття пароперегрівач поділяється на радіаційну, напіврадіаційну і конвективну частини. До радіаційної частини належить частина стельового пароперегрівача, розташована над топковою камерою; до напіврадіаційної - ширмовий пароперегрівач; до конвективної частини - інша частина стельового пароперегрівача і 1,2,3 і 4 ступені конвективного пароперегрівача.

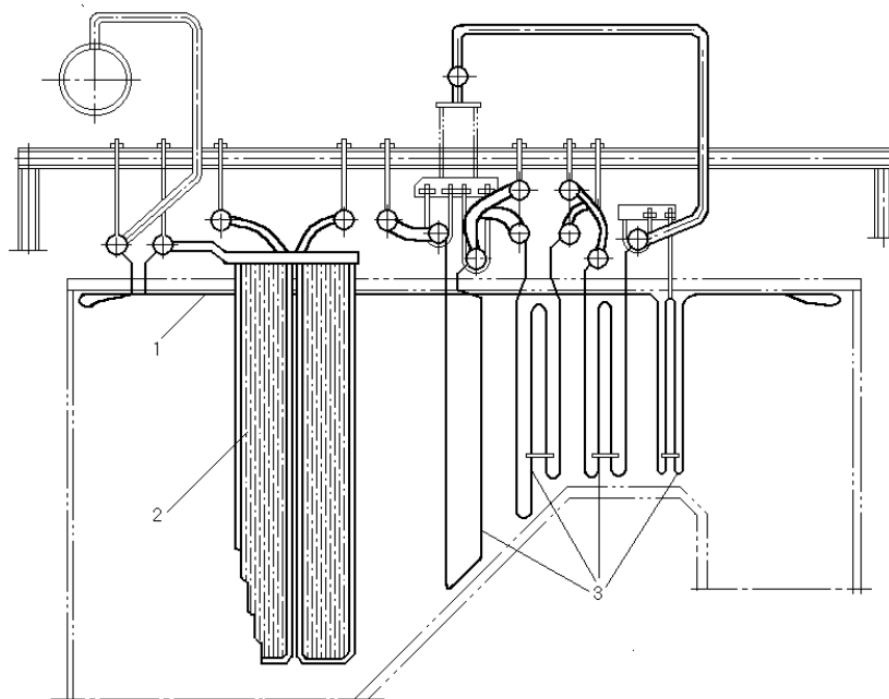


Рис. 2.1 Загальний вигляд пароперегрівача

Перший ступінь конвективного пароперегрівача не має проміжних камер і утворений з труб стельового пароперегрівача.

Напіврадіаційний пароперегрівач складається з 20 ширм, виготовлених з U-подібних труб. Пароперегрівач двопотоковий, з незалежним регулюванням температури пари в кожному потоці. Для регулювання температури пари кожен потік має три горизонтальні пароохолоджувачі впорскувального типу,

розташовані в таких місцях: 1-й пароохолоджувач - у розсічці середніх (холодних) і крайніх (гарячих) ширм; 2-й пароохолоджувач - перед третім ступенем конвективного пароперегрівача; 3-й пароохолоджувач - перед четвертим ступенем конвективного пароперегрівача.

Пароохолоджувач конструктивно являє собою горизонтальний колектор, до якого включено підвідні та відвідні труби попереднього і наступного ступеня пароперегрівача. Стінки камери пароохолоджувача захищені сорочкою від різкого охолодження бризками конденсату.

Дистанціювання рядів труб пароперегрівача за шириною газоходу здійснюється за допомогою гребінок. Кріплення пароперегрівача до металоконструкцій стельового перекриття здійснюється за допомогою тяг і хомутів.

Насичена пара з барабана котла надходить у вхідну камеру стельового пароперегрівача, де розділяється на два потоки (правий і лівий). Пройшовши стельові труби пароперегрівача, прямоточні змійовики конвективної частини I ступеня і далі стельові труби над поворотною камерою, пара повертається по протитечійних змійовиках у зворотній послідовності у вихідний колектор. Далі з вихідної камери пара надходить у вхідні колектори середніх ширм лівого боку. Пройшовши середні ширми, пара прямує в 1-й пароохолоджувач і по ньому перекидається в праву половину по ширині котла у вхідні колектори крайніх ширм. Після крайніх ширм пара надходить у вхідну камеру II ступеня, де розподіляється між пакетами змійовиків II ступеня. Пройшовши II ступінь, пара надходить у 2-й пароохолоджувач, де перекидається в ліву сторону газоходу котла. Далі пара в колекторі розподіляється між пакетами змійовиків III ступеня пароперегрівача. Пройшовши змійовики III ступеня, пара через колектор надходить у 3-й пароохолоджувач і перекидається в правий бік газоходу і надходить у вхідний колектор. У колекторі пара розподіляється між пакетами

змійовиків IV ступеня, пройшовши які збирається у вихідному колекторі IV ступені, звідки прямує в парозбірну камеру. По обох потоках рух пари аналогічний. Таким чином, правий потік пари знаходиться в лівій половині газоходу в таких поверхнях: стельовому і I ступені конвективного пароперегрівача, середніх ширмах і III конвективного ступені, інші поверхні нагріву правого потоку розташовані в правій половині газоходу котла.

Конденсаційна установка

Конденсаційна установка котла призначена для виробництва власного конденсату для впорскування в паровий тракт з метою регулювання температури пари і складається з чотирьох конденсаторів і конденсатозбірника.

Охолоджувальним середовищем слугує живильна вода котла, яка надходить після першого ступеня водяного економайзера і, пройшовши конденсатори, прямує до другого ступеня економайзера. Конденсат утворюється з насиченої пари, що надходить у конденсатори з барабана котла.

Подача конденсату в пароохолоджувачі з конденсаційної установки здійснюється за рахунок перепаду тиску між барабаном і точками уприскування в пароохолоджувачах. Конденсатор являє собою камеру завдовжки 6450 мм, заповнену трубними пучками.

Трубний пучок набрано з труб $\text{Ø}25 \times 3$, виконаних у вигляді петель.

Пара обтікає трубний пучок зовні, охолоджувальна вода проходить всередині трубок-петель. Конденсат, що утворюється, надходить у конденсатозбірник і далі подається до регулювальної арматури впорскування. Поверхня нагріву конденсаторів становить $32,4 \text{ м}^2$.

Повітропідігрівач

Повітропідігрівач сталевий, трубчастий, двоступеневий, виконаний врозсічку із водяним економайзером, чим досягається підігрів повітря до температури 400°C.

Верхній ступінь повітропідігрівача (другий ступінь за ходом повітря) має поверхню нагріву 9120 м² і виготовлений із труб Ø51×1,5 з кроком установки S1=78 мм, S2=51мм, а нижній (перший ступінь за ходом повітря) має поверхню нагріву 19800 м² і виготовлена з труб Ø40×1,5 з кроком установки S1=62 мм і S2=40,5 мм, матеріал труб - ст.20.

Верхній ступінь повітропідігрівача - одноходовий, нижній ступінь - увімкнений за схемою чотириходового перехресного струму. Підведення холодного повітря до нижнього ступеня здійснюється з трьох боків: з фронту, ззаду і збоку, з подальшим розгортанням потоку в трубному пучку нижнього ряду секцій. Така схема руху повітря в нижньому ступені забезпечує відсутність перепускних коробів між секціями цього ступеня.

Весь повітропідігрівач виготовлений у вигляді секцій, що складаються з труб і трубних дощок. Верхній ступінь складається з 12 секцій, нижній - з 24 секцій; висота секції 5 м. Нижній ступінь розділений за висотою на дві частини, утворюючи просвіт висотою 1200 мм, де встановлено шість лазів для огляду та очищення трубної системи.

Для сприйняття теплових переміщень верхній ступінь повітропідігрівача і верхні секції нижнього ступеня спираються на балки каркаса, нижні секції першого ступеня підвішені до каркаса верхніми трубними дошками і вільно розширюються вниз.

Підвищення температури повітря на всмоктуванні дуттьових вентиляторів здійснюється рециркуляцією гарячого повітря з короба гарячого

повітря. Забір повітря на всмоктування вентиляторів виконано з верхньої частини котельного цеху, але є можливість переведення всмоктування повітря з вулиці.

Водяний економайзер

Водяний економайзер виконано зі змійовиків із горизонтальним розташуванням. Змійовики і камери виконані зі сталі марки ст.20. Діаметр труб змійовиків 25×3,5 мм. Водяний економайзер розрахований для підігріву живильної води від 230 до 330°C і виконаний навхрест з повітропідігрівачем.

Поверхня нагріву нижньої частини (першого ступеня за ходом води) водяного економайзера дорівнює 2580 м², а верхньої (другого ступеня походу води) - 1450 м². Змійовики економайзера розташовуються паралельно фронту котла в шаховому порядку з кроком 85 мм у верхньому ступені та 80 мм у нижньому.

Вхідні та вихідні камери економайзера виготовлені з труб, причому камери нижнього ступеня розташовані всередині газоходу, що дає змогу зменшити присмоктування холодного повітря в цю частину газоходу.

У вертикальному положенні пакети змійовиків дистанціонуються стояками, які приварюються до балок і камер, що є одночасно і несучими конструкціями водяного економайзера.

Живильна вода після нижнього ступеня водяного економайзера підводиться в конденсатори і з них у верхній ступінь водяного економайзера. На трубопроводах у розсічці економайзера є чотири дренажі, що слугують для з'єднання нижнього ступеня з верхнім під час спуску води з економайзера і охолодження труб водяного економайзера під час пусків і зупинок котла.

Обмуровка

Обмуровка - система вогнетривких і теплоізоляційних огорожень або конструкцій, призначена для зменшення теплових втрат і забезпечення щільності. У котлах типу ТП-87 застосовано багат шарове обмуровування полегшеного типу, яке складається з таких основних вузлів: обмуровування камери згоряння; обмуровування стельового перекриття, що спирається на труби поверхонь нагріву; обмуровування горизонтального газоходу; обмуровування газоходів хвостових поверхонь нагріву.

У районі камери згоряння обмуровка виконана натрубною і під час теплового розширення труб переміщається разом із трубами екранів вниз. Обмуровка камери згоряння полягає в тому, що на шпильки, приварені до екранних труб, натягують металеву сітку, на яку наносять шар вогнетривкого бетону завтовшки 25 мм, далі укладають три шари совелітових плит по 40 мм, загальною товщиною 125 мм із прошарком совелітової мастики між ними, і шар ущільнювальної обмазки товщиною 20 мм, що лежить на металевій сітці.

Товщина обмуровки топкової камери 170 мм.

Обмуровування газоходу конвективного пароперегрівача, поворотної камери і водяного економайзера збирається з блоків, що представляють собою щити. До щитів кріпиться сітка й армування під вогнетривкий термоізоляційний бетон.

Обмуровування газоходу стельового пароперегрівача і поворотної камери має таку структуру: вогнетривкий бетон-60 мм, термобетон-135-165 мм, три шари совелітових плит із прошарками мастики загальною товщиною 125 мм, зовнішня ущільнювальна газонепроникна обмазка-20 мм. Загальна товщина обмуровки 320-350 мм.

Обмурування конвективних поверхонь нагріву містить вогнетривкий бетон - 80 мм, термобетон - 125 мм, три шари совелітових плит і зовнішню ущільнювальну обмазку. Загальна товщина обмуровки - 350 мм.

Для обмурування газоходів водяного економайзера на сітку наноситься шар вогнетривкого бетону - 40 мм, потім три шари по 30 мм совелітових плит із прошарком совелітової мастики - 2,5 мм між ними.

Загальна товщина обмуровки газоходу водяного економайзера становить 140 мм.

Каркас котла

Каркас котла складається зі сталевих колон, пов'язаних горизонтальними балками, фермами, розкосами, ригелями, зв'язками, і служить для сприйняття навантажень від барабана котла, усіх поверхонь нагрівання, обмуровки, ізоляції, майданчиків обслуговування, а також газових і повітряних коробів та інших елементів котла. Опорні башмаки колон каркаса жорстко кріпляться до підземного залізобетонного фундаменту з допомогою випуску з фундаменту арматури, яка загнута на башмаки і приварена до них.

3. ПОЗОННИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

Позонний тепловий розрахунок топкової камери проводиться після виконання розрахунку топкової камери в цілому і визначення її теплосприйняття поверхні нагріву і температури газів на виході за нормами теплового розрахунку котельних агрегатів. Позонний метод розрахунку застосовується для визначення локальних теплових навантажень по висоті топки. Він дозволяє також встановити характер зміни температури газів в топці. Результати позонного розрахунку використовуються при визначенні температури металу екранних поверхонь нагріву. Позонний розрахунок рекомендується виконувати для всіх видів топкових пристроїв і перш за все для високонавантажених топкових камер парогенераторів великої потужності, зокрема напіввідкритих топок.

Для розрахунку теплових навантажень топка умовно розбивається по висоті на декілька зон. Зона розташування пальників характеризується найбільшим виділенням тепла; з неї починається позонний розрахунок топки. Вона називається зоною максимального тепловиділення. У топках з пережимом зона максимального тепловиділення обмежується перетином пережиму [27].

Тепловий розрахунок зон полягає у визначенні температур газів на виході з кожної зони. Розрахунок температур здійснюють методом послідовних наближень шляхом порівняння попередньо прийнятої і розрахункової величини. Встановлена розрахунком температура на виході із зони повинна відрізнятись від прийнятої не більше, ніж на 30 С.

4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТОПКИ

Розрахунки проведені при використанні природного газу газопроводу Угерсько-Стрий, Угерсько-Гнездичі-Київ, Угерсько-Львів. Його характеристики наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 «Елементарний склад газу, прийнятого до розрахунку»

CH ₂ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	N ₂ , %	CO ₂ , %	Σ, %	Q _H ^c , МДж/м ³	ρ _Г ^c , кг/м ³
98,5	0,2	0,1	1,0	0,2	100	35,496	0,722

4.1. БАЗОВИЙ РОЗРАХУНОК

4.1.1. ОБ'ЄМИ І ЕНТАЛЬПІ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ

У загальному випадку стехіометричну кількість кисню, необхідного для спалювання 1 м³ газоподібного палива визначаємо за формулою:

$$O_2 = \frac{0.5(CO)+0.5(H_2)+1.5(H_2S)+\Sigma(m+n/4)C_mH_n - O_2}{100} \quad (4.1.1.1)$$

Чисельник даного виразу позначимо Θ – коефіцієнт теоретично необхідного кисню для горіння палива.

$$\Theta = (1+4/4)*98.5+(2+4/6)*0.2+(3+8/4)*0.1 = 198.2.$$

Вважаємо, що для базового розрахунку повітря складається тільки з азоту (79%) і кисню (21%).

Тоді кількість теоретично необхідного повітря для горіння палива, складе:

$$V^0 = (0.01/0.21)*\Theta = (0.01/0.21)*198.2 = 9.4381 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4.1.1.2)$$

Теоретична кількість азоту:

$$V^0_{N_2} = 0.79*V^0_{21} + N_2/100 = 0.79*9.4381+1/100 = 7.466 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4.1.1.3)$$

Теоретичний об'єм трьохатомних газів:

$$V_{RO_2} = 0.01*(CO_2+CO+H_2S+\Sigma(mC_mH_n)); \quad (4.1.1.4)$$

$$V_{RO_2}^0 = 0.01 \cdot (0.2 + (1 \cdot 9.85) + (2 \cdot 0.2) + (3 \cdot 0.1)) = 0.994 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм водяних парів:

$$V_{H_2O}^0 = 0.01 \cdot (H_2 + H_2S + \Sigma((n/2)C_m H_n) + 0,124d_{г.пал.} + 0,0161V^п); \quad (4.1.1.5)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0.01 \cdot ((4/2 \cdot 98.5) + (6/2 \cdot 0.2) + (8/4 \cdot 0.1) + 0,124 \cdot 10 + 0,0161 \cdot 9.4381) = 2.144 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Отримані результати розрахунків заносимо в табл. 4.1.1.1.

Таблиця 4.1.1.1 «Коефіцієнти надлишку повітря і об'єми продуктів згоряння»

Величина, що розраховується	Розмірність	ГАЗОХІД	
		Топка	Відхідні газы
Коеф. надлишку повітря α_{cp}	-	1,05	1,05
$V_{с.пов.}^0 = (\alpha_{cp} - 1)V^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	0.472	0.472
Дійсний об'єм водяних парів: $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 (\alpha_{cp} - 1)V^0 = V_{H_2O}^0 + 0,0161 V_{с.пов.}^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	2.152	2.152
Дійсний сумарний об'єм продуктів згоряння: $V_{г} = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha_{cp} - 1)V^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	11.076	11.076
Об'ємна доля трьохатомних газів: $\Gamma_{RO_2} = V_{RO_2}^0 / V_{г}$	-	0.090	0.090
Об'ємна доля водяних парів: $\Gamma_{H_2O} = V_{H_2O}^0 / V_{г}$	-	0.194	0.194
Сумарна об'ємна частка трьохатомних газів: $\Gamma_{п} = \Gamma_{RO_2} + \Gamma_{H_2O}$	-	0.283	0.283

Ентальпія теоретичного об'єму повітря, МДж/м³:

$$\Gamma_{п}^0 = V^0(C_9)_{пов.} \quad (4.1.1.6)$$

Ентальпія теоретичного об'єму газів, МДж/м³:

$$\Gamma_{г}^0 = V_{RO_2}^0(C_9)^{CO_2} + V_{N_2}^0(C_9)^{N_2} + V_{H_2O}^0(C_9)^{H_2O}. \quad (4.1.1.7)$$

Ентальпія димових газів, МДж/м³:

$$I = \Gamma_{г}^0 + (\alpha_{i \text{ cp.}} - 1)\Gamma_{п}^0 \quad (4.1.1.8)$$

Результати розрахунків ентальпії продуктів згоряння наведені в таблиці 4.1.1.2.

Таблиця 4.1.1.2 «Ентальпії продуктів згоряння»

Температура, °С	I°п, МДж/м ³	I°г, МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.249	1.461	1.524	1.551	1.524	1.551
200	2.513	2.949	3.075	1.589	3.075	1.589
300	3.802	4.474	4.664	1.635	4.664	
400	5.114	6.043	6.299	1.677		
500	6.457	7.653	7.976	1.708		
600	7.832	9.291	9.683	1.757		
700	9.247	10.978	11.440	1.811		
800	10.670	12.717	13.251	1.846		
900	12.093	14.492	15.097	1.879		
1000	13.555	16.298	16.976	1.885		
1100	15.056	18.109	18.861	1.898		
1200	16.558	19.932	20.760	1.948		
1300	18.060	21.805	22.708	1.985		
1400	19.601	23.713	24.693	1.972		
1500	21.142	25.607	26.664	2.003		
1600	22.683	27.533	28.667	2.016		
1700	24.225	29.472	30.684	2.025		
1800	25.766	31.421	32.709	2.058		
1900	27.346	33.400	34.767	2.049		
2000	28.927	35.370	36.817	2.072		
2100	30.508	37.363	38.888	2.081		
2200	32.089	39.364	40.969			

4.1.2. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Тепловий розрахунок топки котла ТП-87 проводився на основі методів і підходів, викладених в нормативному документі «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод» [28].

Розрахунок теплового балансу котельного агрегату наведений в таблиці 4.1.2.1, тепловий розрахунок топки – в таблиці 4.1.2.2.

Таблиця 4.1.2.1 «Тепловий баланс»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Теплотворна здатність палива	Q_p^p	ккал/м ³	Q_n^p	8480
Температура димових газів	ϑ_{yx}	°С	Прийнята попередньо	160
Ентальпія димових газів	I_{yx}	ккал/м ³	По таблиці I-9	586,23
Температура холодного повітря	$t_{x.v.}$	°С	Прийнята	30
Ентальпія холодного повітря	$I_{x.v.}^0$	ккал/м ³	По таблиці I-9	100,205
Втрати теплоти від хімічного недопалу	q_3	%	По таблиці XVIII НМ	0,5
Втрати теплоти з димовими газами	q_2	%	$\frac{(I_{yx}^0 - \alpha_{yx} * I_{x.v.}^0) * (100 - q_4)}{Q_p^p}$	$\frac{(586,23 - 1,05 * 100,205) * (100 - 0)}{8480}$ =5,672
Втрати теплоти в навколишнє середовище	q_5	%	Прийнята	0,41
Сума втрат теплоти	Σq_i	%	$\Sigma q_i = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$	6,582
ККД	η	%	$100 - \Sigma q_i$	93,418
Тиск перегрітої пари	$p_{пп}$	кгс/см ²	Заданий	140
Температура перегрітої пари	$t_{пп}$	°С	Задана	560
Ентальпія перегрітої пари	$i_{пп}$	ккал/кг	По таблиці XXVII НМ	833,2

Продовження таблиці 4.1.2.1 «Тепловий баланс»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Температура живильної води	$t_{пв}$	°С	Задана	230
Ентальпія живильної води	$i_{пв}$	ккал/кг	По таблиці XXVII НМ	238,2
Паропродуктивність котла	$D_{розр}$	кг/год	Заданий	420000
Тепло, що корисно використовується в котлоагрегаті	$Q_{ка}$	ккал/год	$D \cdot (i_{пп} - i_{пв})$	$420000 \cdot (833,3 - 238,2) = 249900000$
Повна витрата палива	V_p	м ³ /год	$\frac{Q_{к. а.} \cdot 100}{Q^{пр} \cdot \eta_{к. а.}}$	$\frac{249900000 \cdot 100}{8480 \cdot 93,418} = 31546$
Коефіцієнт збереження теплоти	ϕ	-	$1 - \frac{q_5}{\eta_{к. а.} + q_5}$	$1 - \frac{0,41}{93,418 + 0,41} = 0,9956$

Таблиця 4.1.2.2 «Топка»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Коефіцієнт надлишку повітря в топці	α_T	-	Із таблиці продуктів згорання	1,05
Температура гарячого повітря	$t_{г.в.}$	°C	Прийнята попередньо	400
Ентальпія гарячого повітря	$I_{г.в.}^0$	ккал/кг	По таблиці І-9	1221,29
Тепло, що вноситься повітрям в топку	Q_B	ккал/кг	$\alpha_{cp} * I_{г.в.}^0 + \Delta\alpha_i * I_{х.в.}^0$	$1,05 * 1221,29 + 0 * 100,205 = 1282,354$
Корисне тепловиділення в топці	Q_T	ккал/кг	$Q_{p^p} * (100 - q_3) / 100 + Q_B$	$8480 * \frac{100 - 0,5}{100} + 1282,354 = 9719,954$
Теоретична температура горіння	ϑ_a	°C	По таблиці І-9	2187
Відносне розташування максимуму температур по висоті топки	x_T	-	h_T / H_T	$4,5 / 28,25 = 0,159$
Параметр	M	-	По п. 6-13 НМ	0,48
Температура газів на виході з топки	ϑ''_T	°C	Прийнята попередньо	1200
Ентальпія газів на виході з топки	I''_T	ккал/м ³	По таблиці І-9	4958,08
Середня сумарна теплоємність продуктів згорання	$V_{ср}$	ккал/(м ³ *°C)	$\frac{Q_T - I''_T}{\vartheta_a - \vartheta''_T}$	$\frac{9719,954 - 4958,08}{2187 - 1200} = 4,823$
Добуток	$p_{пS}$	(м*кгс)/см ²	$p_{пS}$	$1 * 0,283 * 5,794 = 1,642$

Продовження таблиці 4.1.2.2 «Топка»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	$1/(м*кгс/см^2)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61rH_2O}{\sqrt{P_{\Pi S}}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{T''_T}{1000}\right)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{1,642}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{1200 + 273}{1000}\right) = 0,342$
Оптична товщина	k_{ps}	-	$k_r r_{\Pi} ps$	$0,342 * 1,642 = 0,562$
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	$1 - e^{-k_{ps}}$	$1 - e^{-0,562} = 0,430$
Коефіцієнт теплової ефективності екранів	$\Psi_{\text{екр}}$	-	По таблиці 6-2 НМ	$0,65 * 0,99 = 0,635$
Коефіцієнт, що враховує забруднення ширм, що розташовані у вихідному вікні топки	$\zeta_{\text{ок}}$	-	По таблиці 6-2 НМ	$0,57 * 0,65 = 0,371$
Коефіцієнт теплової ефективності ширм, розташованих у вихідному вікні топки	$\Psi_{\text{ок}}$	-	По таблиці 6-2 НМ	$0,57 * 0,65 = 0,367$
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	$\frac{\sum \Psi_i F_i}{\sum F_{\text{ст}}}$	$0,6435 * 339,99 + 0,6435 * (796,07 - 158,51) + 0,367 * 158,51 + 0 * 12 / 1148,06 = 0,599$
Ступінь чорноти топки	a_T	-	$\frac{a_{\phi}}{a_{\phi} + (1 - a_{\phi}) * \Psi_{\text{ср}}}$	$\frac{0,430}{0,430 + (1 - 0,430) * 0,599} = 0,557$
Температура газів на виході з топки	ϑ''_T	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{T_a}{M \left(\frac{4,9 * 10^{-8} \Psi_{\text{ср}} \alpha_T F_{\text{ст}} T_a^3}{\phi B_p V_{\text{ср}}} \right)^{0,6} + 1} - 273$	$\frac{2187 + 273}{(4,9 * 10^{-8} * 0,599 * 0,577 * 0,48 \left[\frac{1148,06 * (2187 + 273)^3}{0,996 * 31546 * 4,823} \right]^{0,6} + 1} - 273 = 1180$

Продовження таблиці 4.1.2.2 «Топка»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Ентальпія газів на виході з топки	I''_T	ккал/м ³	По таблиці І-9	4867,62
Кількість теплоти, сприйнятої в топці	Q^T_L	ккал/м ³	$\varphi(Q_T - I''_T)$	$0,996 \cdot (9719,954 - 4867,62) = 4831,13$
Середнє теплове навантаження променесприймаючої поверхні нагріву	q_L	ккал/(м ² *год)	$\frac{V_p \cdot Q_L^T}{F_{ст} - F_{гор}}$	$\frac{31546 \cdot 4831,13}{1148,06 - 12} = 134150$
Теплонапруга топкового об'єму (до ширм)	q_v	ккал/(м ³ *год)	$\frac{V_p \cdot Q_p^p}{V_T}$	$\frac{31546 \cdot 8480}{1847,767} = 144774$

4.1.3. ПОЗОННИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

В даній роботі для котельного агрегату ТП-87 здійснюється позонний розрахунок топкової камери за нормативним методом [28]. Для цього топка по висоті розбивається умовно на п'ять зон (рис. 4.1.3.1) наступним чином:

- Перша – зона максимального тепловиділення – обмежується пережимом топки і фактично утворює камеру згоряння висотою 7,47 м.
- Від пережиму до аеродинамічного виступу топка ділиться на 3 рівні зони висотою 3,23 м.
- Остання – п'ята зона – частина топки від аеродинамічного виступу до своду висотою 11,1 м.

Конструктивні характеристики зон наведені в таблиці 4.1.6.

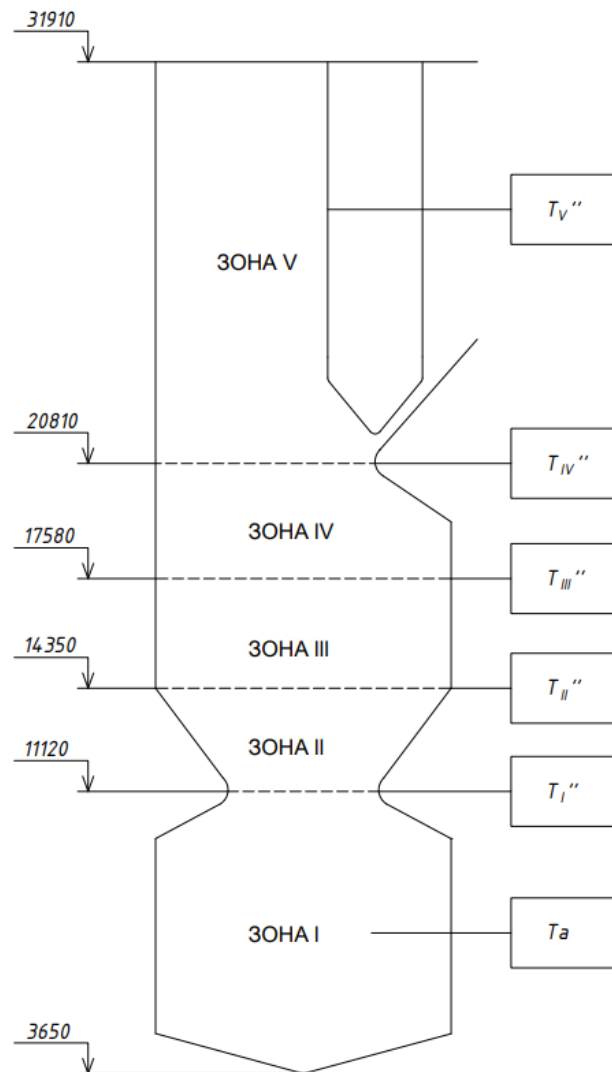


Рисунок 4.1.3.1 Схема розбивки топки на зони.

Таблиця 4.1.3.1 «Конструктивні характеристики»

<i>Зона I</i>				
Сумарна екранована поверхня стін	$F_{стI}$	m^2	По конструктивним характеристика топки в цілому	339,99
Переріз топкової камери, що обмежує зону зверху	$F_{сI}$	m^2	По кресленню	31,702
<i>Зона II</i>				
Сумарна поверхня	$F_{стII}$	m^2	По кресленню	89,744
Середня площа перерізу топки	$F_{с.ср}$	m^2	По кресленню	60,5
<i>Зона III</i>				
Сумарна поверхня стін	$F_{стIII}$	m^2	По кресленню	59,755
Середня площа перерізу топки	$F_{с.ср}$	m^2	По кресленню	77,44
<i>Зона IV</i>				
Сумарна поверхня стін	$F_{стIV}$	m^2	$F_{стIV} = F_{стIII}$	59,755
Поверхня вихідного вікна в ширмовий перегрівач	$F_{ок.ш}$	m^2	По кресленню	25,41
Середня площа перерізу топки в зоні	$F_{с.ср}$	m^2	$(F_{с1} + F_{с2})/2$	$(77,44+12,1*5)/2 = 68,97$
<i>Зона V</i>				
Сумарна поверхня стін	$F_{стV}$	m^2	По кресленню	165,1
Поверхня вихідного вікна в ширмовий перегрівач	$F_{ок.ш}$	m^2	По кресленню	133,1

Далі проводиться розрахунок кожної зони окремо від зони максимального тепловиділення до виходу з топки. Методом послідовних наближень визначається температура димових газів на виході з кожної зони. Розрахунки зон наведені в таблицях 4.1.3.2-4.1.3.7.

Таблиця 4.1.3.2 «І зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Відносна висота зони	h_l/H_T	-	По кресленню	$7,47/28,26 = 0,264$
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{I^{CT}}$	-	По таблиці XXII НМ	0,96
Тепло, що вноситься в топку повітрям	Q_B	ккал/кг	Із розрахунку топки в цілому	1282,354
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	Прийнята попередньо	1560
Ентальпія	I''	ккал/м ³	По таблиці I-9	6655,30
Теплоємність продуктів згоряння	$V_{c''}$	ккал/(м ³ *°C)	I''/ϑ''	$6655,30/1560 = 4,266$
Добуток	$p_{пS}$	(м*кгс)/см ²	$p_{пS}$	$1*0,283*5,794 = 1,642$
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_{Γ}	1/(м*кгс/см ²)	$\left(\frac{0,78 + 1,61r_{H2O}}{\sqrt{p_{пS}}} - 0,1\right) * (1 - 0,37 \frac{T''_{\Gamma}}{1000})$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{(0,283 * 1 * 0,782)}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{(1560 + 273)}{1000}\right) = 0,714$
Оптична товщина	k_{ps}	-	$k_{\Gamma p_{пS}}$	$0,714*1,642 = 1,173$
Співвідношення складу вулецю і водню в робочій масі палива	C_p/H_p	-	$0,12\sum(m/n)C_mH_n$	$0,12*(1/4*98,5+2/6*0,2+3/8*0,1) = 2,968$
Коефіцієнт ослаблення променів сажистими частинками	k_c	1/(м*кгс/см ²)	$0,3(2 - \alpha_{\Gamma})(1,6*10^{-3}*T''_{\Gamma} - 0,5)*C_p/H_p$	$0,3(2 - 1,05)(1,6*10^{-3}*1200 + 273) - 0,5)*2,968 = 1,570$
Ступінь чорноти факела	a_{Φ}	-	$ma_{CB} + (1-m)a_{\Gamma}$	$0,6*(1 - e^{-1,173} + (1-0,6)* (1 - e^{-(0,714*0,283+1,570)*1*5,794})) = 0,654$
Середній коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ_{cp}	-	Із розрахунку топки	0,599

Продовження таблиці 4.1.3.2 «І зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	Ψ'	-	По п. 6-38 НМ	0,1
Добуток коефіцієнта теплової ефективності на сумарну поверхню, що обмежує зону	ΨF	-	$\Psi_{cp} * F_{ctI} + \Psi' * F_{cI}$	$0,599 * 339,99 + 0,1 * 31,702 = 206,678$
Ступінь чорноти топки	a_T	-	$\frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi) \Psi_{cp}}$	$\frac{0,654}{0,654 + (1 - 0,654) * 0,599} = 0,760$
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	$\frac{\beta I_{cr} * Q_p^D + Q_{в}}{Vc''} - \frac{4,9 * 10^{-8} a_T T''^4}{V_p * Vc''} * \Psi F$	$\frac{0,96 * 8480 + 1282,354}{4,266} - \frac{4,9 * 10^{-8} * 0,760 * (1560 + 273)^4}{31546 * 4,266} * 206,678 = 1563$
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лI}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi a_T T''^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,599 * 0,760 * (1563 + 273)^4 = 253426$

Таблиця 4.1.3.3 «Ступінь чорноти топки останньої зони»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Температура димових газів на виході з останньої зони	ϑ''	°C	Прийнята попередньо	1150
Добуток	$p_{пс}$	(м*кгс)/см ²	$p_{пс}$	$1 * 0,283 * 5,794 = 1,642$
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	$\left(\frac{0,78 + 1,61 r_{H2O}}{\sqrt{p_{пс}}} - 0,1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{T''_{г}}{1000} \right)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{(0,283 * 1 * 0,782)}} - 0,1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{(1150 + 273)}{1000} \right) = 1,051$
Оптична товщина	k_{ps}	-	$k_{г} r_{п} p_{с}$	$1,051 * 1,642 = 1,725$
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	$1 - e^{-k_{ps}}$	$1 - e^{-1,725} = 0,822$
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	По таблиці 6-2 НМ	$0,65 * 0,99 = 0,644$
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширми	$\Psi_{ш}$	-	Ψ_{β}	$0,55 * 0,65 = 0,358$
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	$\frac{\sum \Psi_i F_i}{\sum F_{ст}}$	$\frac{0,644 * 165,1 + 0,358 * 133,1}{165,1 + 133,1} = 0,516$
Ступінь чорноти топки	$a_{г}$	-	$\frac{a_{ф}}{a_{ф} + (1 - a_{ф}) * \Psi_{ср}}$	$\frac{0,822}{0,822 + (1 - 0,822) * 0,516} = 0,899$

Таблиця 4.1.3.4 «II зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Відносна висота зони	h_{II}/H_T	-	По кресленню	$3,23/28,26 = 0,114$
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{II}^{сг}$	-	По таблиці XXII НМ	0,955
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	Із розрахунку I зони	1563
Ентальпія	I'	ккал/м ³	По таблиці I-9	6671,73
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	Прийнята попередньо	1390
Ентальпія	I''	ккал/м ³	По таблиці I-9	5849,936
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°C)	I''/ϑ''	$5849,936/1390 = 4,209$
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	-	$4,266/4,209 = 1,014$
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	$(\vartheta' + \vartheta'')/2$	$(1563+1390)/2 = 1477$
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	По таблиці 6-2 НМ	$1,1*0,65 = 0,715$
Добуток	$p_{пs}$	(м*кгс)/см ²	$p_{пs}$	$1*0,283*5,794 = 1,642$
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	$\left(\frac{0,78 + 1,61r_{H2O}}{\sqrt{p_{пs}}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{T''_T}{1000}\right)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{(0,283 * 1 * 0,782)}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{(1390 + 273)}{1000}\right) = 0,854$
Оптична товщина	k_{ps}	-	$k_{г} r_{п} p_s$	$0,854*1,642 = 1,402$
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	$1 - e^{-k_{ps}}$	$1 - e^{-1,408} = 0,754$

Продовження таблиці 4.1.3.4 «II зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Ступінь чорноти топки	a_T	-	$\frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi)\Psi_{cp}}$	$\frac{0,754}{0,754 + (1 - 0,754) * 0,715} = 0,811$
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	По п. 6-39 НМ	0
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	$\frac{(\beta_{IIcT} - \beta_{IcT})Q_p^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''}\vartheta' - \left(1 + \left(\frac{T''}{T'}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} a_T T'^4}{2BpVc''} * (F_{c, cp}(\Psi'' - \Psi') + \Psi_{cp}F_{cTII})$	$\frac{(0,955 - 0,96)8480}{4,209} + 1,014 * 1563 - \left(1 + \left(\frac{1390 + 273}{1563 + 273}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} * 0,811 * (1563 + 273)^4}{2 * 31546 * 4,209} * (60,5 * 0 + 0,715 * 89,744 = 1392)$
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лII}$	ккал/(м²*год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi_{aT} T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,715 * 0,811 * ((1563 + 1392) / 2 + 273)^4 = 266881$

Таблиця 4.1.3.5 «III зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Відносна висота зони	$h_{\text{III}}/H_{\text{T}}$	-	По кресленню	$3,23/28,26 = 0,114$
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{\text{III}}^{\text{CT}}$	-	По таблиці XXII НМ	0,96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	Із розрахунку II зони	1392
Ентальпія	I'	ккал/м ³	По таблиці I-9	5860,162
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	Прийнята попередньо	1325
Ентальпія	I''	ккал/м ³	По таблиці I-9	5541,771
Теплоємність продуктів згорання	V_{C}''	ккал/(м ³ *°C)	I''/ϑ''	$5541,771/1325 = 4,182$
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	-	$4,209/4,182 = 1,006$
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	$(\vartheta' + \vartheta'')/2$	$(1392+1325)/2 = 1359$
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	По таблиці 6-2 НМ	$1,1*0,65 = 0,715$
Добуток	$p_{\text{пS}}$	(м*кгс)/см ²	$p_{\text{пS}}$	$1*0,283*5,794 = 1,642$
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_{T}	1/(м*кгс/см ²)	$\left(\frac{0,78 + 1,61r_{\text{H2O}}}{\sqrt{p_{\text{пS}}}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{T''_{\text{T}}}{1000}\right)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{(0,283 * 1 * 0,782)}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{(1325 + 273)}{1000}\right) = 0,907$
Оптична товщина	k_{ps}	-	$k_{\text{T}} r_{\text{п}} p_{\text{S}}$	$0,907*1,642 = 1,489$
Ступінь чорноти факела	$a_{\text{ф}}$	-	$1 - e^{-k_{\text{ps}}}$	$1 - e^{-1,489} = 0,775$

Продовження таблиці 4.1.3.5 «III зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Ступінь чорноти топки	a_T	-	$\frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi)\Psi_{cp}}$	$\frac{0,775}{0,775 + (1 - 0,775) * 0,715} = 0,828$
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	По п. 6-39 НМ	-0,05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	$\frac{(\beta_{IIIcг} - \beta_{IIcг})Q_p^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''}\vartheta' - \left(1 + \left(\frac{T''}{T'}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} a_T T'^4}{2BpVc''} * (F_{c, cp}(\Psi'' - \Psi') + \Psi_{cp}F_{cгIII})$	$\frac{(0,96 - 0,955)8480}{4,180} + 1,007 * 1392 - \left(1 + \left(\frac{1325 + 273}{1392 + 273}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} * 0,828 * (1392 + 273)^4}{2 * 31546 * 4,182} * (77,44 * (-0,05) + 0,715 * 59,755) = 1326$
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лIII}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi a_T T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,715 * 0,828 * ((1392 + 1326)/2 + 273)^4 = 205784$

Таблиця 4.1.3.6 «IV зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{IV}^{сг}$	-	По таблиці XXII НМ	0,96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°С	Із розрахунку III зони	1326
Ентальпія	I'	ккал/м ³	По таблиці I-9	5547,17
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°С	Прийнята попередньо	1270
Ентальпія	I''	ккал/м ³	По таблиці I-9	5283,70
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°С)	I''/ϑ''	$5283,70/1270 = 4,160$
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	-	$4,182/4,160 = 1,005$
Середня температура газів в зоні	ϑ	°С	$(\vartheta' + \vartheta'')/2$	$(1326+1270)/2 = 1298$
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{экр}$	-	По таблиці 6-2 НМ	0,65
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{ш}$	-	$\beta \Psi_{экр}$	$0,57*0,65 = 0,371$
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	$(\Psi_{экр} F_{экр} + \Psi_{ш} F_{ш})/\Sigma F$	$\frac{0,65 * 59,755 + 0,371 * 25,41}{59,755 + 25,41} = 0,567$
Добуток	$p_{пS}$	(м*кгс)/см ²	$p_{гпS}$	$1*0,283*5,794 = 1,642$
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	$\left(\frac{0,78 + 1,61r_{H2O}}{\sqrt{p_{пS}}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{T''_{г}}{1000}\right)$	$\left(\frac{0,78 + 1,61 * 0,194}{\sqrt{(0,283 * 1 * 0,782)}} - 0,1\right) * \left(1 - 0,37 \frac{(1270 + 273)}{1000}\right) = 0,952$

Продовження таблиці 4.1.3.6 «IV зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Оптична товщина	$k_{\Gamma p}$	-	$k_{\Gamma p} \rho s$	$0,952 * 1,642 = 1,564$
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	$1 - e^{-k_{\Gamma p}}$	$1 - e^{-1,564} = 0,791$
Ступінь чорноти топки	a_{Γ}	-	$\frac{a_{\phi}}{a_{\phi} + (1 - a_{\phi})\Psi_{cp}}$	$\frac{0,791}{0,791 + (1 - 0,791) * 0,567} = 0,870$
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	По п. 6-39 НМ	-0,05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{(\beta IV_{c\Gamma} - \beta III_{c\Gamma})Q_p^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''}\vartheta' - \left(1 + \left(\frac{T''}{T'}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} a_{\Gamma} T'^4}{2BpVc''} * (F_{c, cp}(\Psi'' - \Psi') + \Psi_{cp}F_{c\Gamma IV})$	$\frac{(0,96 - 0,96)8480}{4,160} + 1,005 * 1326 - \left(1 + \left(\frac{1270 + 273}{1326 + 273}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} * 0,870 * (1326 + 273)^4}{2 * 31546 * 4,160} * (68,97 * (-0,05) + 0,567 * 59,755) = 1273$
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лIV}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi_{a_{\Gamma}} T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,65 * 0,870 * ((1326 + 1273)/2 + 273)^4 = 169350$
Середнє теплове навантаження	$q_{л, шIV}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi_{ш a_{\Gamma}} T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,371 * 0,870 * ((1326 + 1273)/2 + 273)^4 = 96529$

Таблиця 4.1.3.7 «V зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{\text{экр}}$	-	По таблиці 6-2 НМ	0,585
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{\text{ш}}$	-	$\beta \Psi_{\text{экр}}$	$0,57 * 0,585 = 0,333$
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	$\frac{\sum \Psi_i F_i}{\sum F_{\text{ст}}}$	$\frac{0,585 * 165,1 + 0,333 * 133,1}{165,1 + 133,1} = 0,473$
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{\text{в}^{\text{ст}}}$	-	По таблиці XXII НМ	0,96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°С	Із розрахунку IV зони	1273
Ентальпія	Γ'	ккал/м ³	По таблиці I-9	5297,27
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°С	Прийнята попередньо	1155
Ентальпія	Γ''	ккал/м ³	По таблиці I-9	4754,04
Теплоємність продуктів згорання	$\nu_{\text{с}''}$	ккал/(м ³ *°С)	Γ'' / ϑ''	$4754,04 / 1155 = 4,116$
Відношення теплоємностей	$\text{с}' / \text{с}''$	-	-	$4,160 / 4,116 = 1,011$
Середня температура газів в зоні	ϑ	°С	$(\vartheta' + \vartheta'') / 2$	$(1273 + 1155) / 2 = 1214$
Ступінь чорноти топки	$a_{\text{т}}$	-	Див. вище	0,899
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	По п. 6-39 НМ	0

Продовження таблиці 4.1.3.7 «V зона»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Формула або обґрунтування	Розрахунок або дані креслень
Температура газів на виході з зони	ϑ''	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{(\beta_{\text{IIcг}} - \beta_{\text{Icг}})Q_p^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''}\vartheta' -$ $- \left(1 + \left(\frac{T''}{T'}\right)^4\right) * \frac{4,9 * 10^{-8} a_T T'^4}{2BpVc''} *$ $* (F_{\text{с. ср}}(\Psi'' - \Psi') + \Psi_{\text{ср}}F_{\text{ст}})$	$\frac{(0,96 - 0,96)8480}{4,116} + 1,011 * 1273 -$ $- \left(1 + \left(\frac{1155 + 273}{1273 + 273}\right)^4\right) *$ $* \frac{4,9 * 10^{-8} * 0,899 * (1273 + 273)^4}{2 * 31546 * 4,116} *$ $* (133,1 * 0 + 0,473 * 165,1 = 1156)$
Ентальпія	Γ''	ккал/м ³	По таблиці I-9	4758,11
Середня температура газів в зоні	ϑ	$^{\circ}\text{C}$	$(\vartheta' + \vartheta'')/2$	$(1273 + 1156)/2 = 1214$
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{\text{л.в}}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi_{\text{а.т}} T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,585 * 0,899 * (1214 + 273)^4 = 126198$
Середнє теплове навантаження	$q_{\text{л.ш.в}}$	ккал/(м ² *год)	$4,9 * 10^{-8} \Psi_{\text{ш.а.т}} T^4$	$4,9 * 10^{-8} * 0,333 * 0,899 * (1214 + 273)^4 = 71933$

4.2. ЗБАГАЧЕННЯ КИСНЕМ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ

Повітря, що подається в топку, збагачується киснем методом мембранного розділення повітря. Розрахунки проводяться при концентрації кисню в дуттьовому повітрі 23, 25, 27 та 29%.

4.2.1. ОБ'ЄМИ І ЕНТАЛЬПІ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ

Тоді кількість теоретично необхідного повітря для горіння палива, відповідно для концентрації кисню в дуттьовому повітрі 23, 25, 27 і 29%, складе:

$$V_{23}^n = (0.01/0.23) * \Theta = (0.01/0.23) * 198.2 = 8.6174 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.1)$$

$$V_{25}^n = (0.01/0.25) * \Theta = (0.01/0.25) * 198.2 = 7.928 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.2)$$

$$V_{27}^n = (0.01/0.27) * \Theta = (0.01/0.27) * 198.2 = 7.3407 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.3)$$

$$V_{29}^n = (0.01/0.29) * \Theta = (0.01/0.29) * 198.2 = 6.8345 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4.2.1.4)$$

Теоретична кількість азоту, відповідно для концентрації кисню в дуттьовому повітрі 23, 25, 27 і 29%:

$$V_{N_2}^{23} = 0.77 * V_{23}^n + N_2/100 = 0.77 * 8.6174 + 1/100 = 6.645 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.5)$$

$$V_{N_2}^{25} = 0.75 * V_{25}^n + N_2/100 = 0.75 * 7.928 + 1/100 = 5.956 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.6)$$

$$V_{N_2}^{27} = 0.73 * V_{27}^n + N_2/100 = 0.73 * 7.3407 + 1/100 = 5.369 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2.1.7)$$

$$V_{N_2}^{29} = 0.71 * V_{29}^n + N_2/100 = 0.71 * 6.8345 + 1/100 = 4.862 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4.2.1.8)$$

Теоретичний об'єм трьохатомних газів:

$$V_{RO_2} = 0.01 * (CO_2 + CO + H_2S + \Sigma(mC_mH_n)); \quad (4.2.1.9)$$

$$V_{RO_2}^0 = 0.01 * (0.2 + (1 * 9.85) + (2 * 0.2) + (3 * 0.1)) = 0.994 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм водяних парів, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{H_2O}^0 = 0.01 * (H_2 + H_2S + \Sigma((n/2)C_mH_n) + 0,124d_{г.пал.} + 0,0161V^n); \quad (4.2.1.10)$$

Відповідно для концентрації кисню в дуттьовому повітрі 23, 25, 27 і 29%:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{23} = 0.01 * ((4/2 * 98.5) + (6/2 * 0.2) + (8/4 * 0.1) + 0,124 * 10 + 0,0161 * 6.645) =$$

$$= 2.131 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{25} = 0.01 * ((4/2 * 98.5) + (6/2 * 0.2) + (8/4 * 0.1) + 0,124 * 10 + 0,0161 * 5.956) =$$

$$= 2.12 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{27} = 0.01 * ((4/2 * 98.5) + (6/2 * 0.2) + (8/4 * 0.1) + 0,124 * 10 + 0,0161 * 5.369) =$$

$$= 2.111 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{29} = 0.01 * ((4/2 * 98.5) + (6/2 * 0.2) + (8/4 * 0.1) + 0,124 * 10 + 0,0161 * 4.862) =$$

$$= 2.102 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Результати розрахунків об'ємів продуктів згоряння після збагачення дуттьового повітря киснем заносимо в таблицю 4.2.1.1.

Таблиця 4.2.1.1 «Коефіцієнти надлишку повітря і об'єми продуктів згоряння при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Розмірність	Концентрація кисню, %			
		23	25	27	29
Коеф. надлишку повітря $\alpha_{\text{ср}}$	-	1.05	1.05	1.05	1.05
$V_{\text{с.пов.}}^0 = (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	0.431	0.396	0.367	0.342
Дійсний об'єм водяних парів: $V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0 =$ $= V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 V_{\text{с.пов.}}^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	2.138	2.126	2.116	2.108
Дійсний сумарний об'єм продуктів згоряння: $V_{\Gamma} = V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	10.201	9.466	8.840	8.301
Об'ємна доля трьохатомних газів: $\Gamma_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}^0 / V_{\Gamma}$	-	0.097	0.105	0.112	0.120
Об'ємна доля водяних парів: $\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 / V_{\Gamma}$	-	0.209	0.224	0.239	0.253
Сумарна об'ємна частка трьохатомних газів: $\Gamma_{\Pi} = \Gamma_{\text{RO}_2} + \Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	-	0.306	0.329	0.351	0.373

Ентальпії продуктів згоряння розраховуються за формулами (4.1.1.6)-(4.1.1.8). Їх значення при концентрації кисню в дуттьовому повітрі 23, 25, 27 і 29% наведені в таблицях 4.2.1.2-4.2.1.5.

Таблиця 4.2.1.2 «Ентальпії продуктів згоряння при концентрації кисню 23%»

Температура, °C	Γ_n , МДж/м ³	Γ_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.140	1.353	1.410	1.437	1.410	1.437
200	2.295	2.732	2.847	1.473	2.847	1.473
300	3.471	4.146	4.320	1.517	4.320	
400	4.669	5.603	5.836	1.556		
500	5.896	7.097	7.392	1.585		
600	7.151	8.619	8.976	1.632		
700	8.443	10.186	10.608	1.682		
800	9.742	11.803	12.290	1.714		
900	11.041	13.451	14.004	1.746		
1000	12.376	15.131	15.750	1.752		
1100	13.747	16.815	17.502	1.766		
1200	15.118	18.512	19.268	1.811		
1300	16.489	20.255	21.079	1.845		
1400	17.897	22.029	22.924	1.835		
1500	19.304	23.794	24.759	1.863		
1600	20.711	25.586	26.622	1.876		
1700	22.118	27.392	28.498	1.885		
1800	23.525	29.207	30.383	1.914		
1900	24.969	31.049	32.297	1.909		
2000	26.412	32.885	34.206	1.928		
2100	27.855	34.741	36.133	1.936		
2200	29.298	36.605	38.070			

Таблиця 4.2.1.3 «Ентальпії продуктів згоряння при концентрації кисню 25%»

Температура, °C	Γ_n , МДж/м ³	Γ_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.049	1.262	1.314	1.341	1.314	1.341
200	2.111	2.549	2.655	1.375	2.655	1.375
300	3.193	3.871	4.030	1.417	4.030	
400	4.295	5.233	5.447	1.454		
500	5.424	6.631	6.902	1.481		
600	6.579	8.054	8.383	1.526		
700	7.768	9.521	9.909	1.573		
800	8.963	11.034	11.483	1.603		
900	10.158	12.577	13.085	1.635		
1000	11.386	14.151	14.720	1.641		
1100	12.647	15.729	16.361	1.654		
1200	13.909	17.319	18.015	1.697		
1300	15.170	18.953	19.711	1.727		
1400	16.465	20.615	21.439	1.720		
1500	17.759	22.271	23.159	1.745		
1600	19.054	23.951	24.904	1.758		
1700	20.349	25.644	26.662	1.767		
1800	21.643	27.347	28.429	1.794		
1900	22.971	29.074	30.222	1.791		
2000	24.299	30.798	32.013	1.807		
2100	25.627	32.538	33.820	1.815		
2200	26.954	34.287	35.635			

Таблиця 4.2.1.4 «Ентальпії продуктів згоряння при концентрації кисню 27%»

Температура, °C	Γ_n , МДж/м ³	Γ_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	0.971	1.184	1.233	1.259	1.233	1.259
200	1.955	2.394	2.492	1.292	2.492	1.292
300	2.957	3.636	3.784	1.332	3.784	
400	3.977	4.917	5.116	1.368		
500	5.022	6.233	6.484	1.393		
600	6.092	7.573	7.877	1.437		
700	7.192	8.954	9.314	1.481		
800	8.299	10.380	10.795	1.508		
900	9.405	11.833	12.303	1.540		
1000	10.543	13.316	13.843	1.546		
1100	11.711	14.803	15.389	1.559		
1200	12.878	16.303	16.947	1.599		
1300	14.046	17.844	18.546	1.627		
1400	15.245	19.411	20.173	1.622		
1500	16.444	20.973	21.795	1.645		
1600	17.643	22.558	23.440	1.658		
1700	18.841	24.156	25.098	1.667		
1800	20.040	25.762	26.764	1.691		
1900	21.269	27.392	28.455	1.690		
2000	22.499	29.020	30.145	1.704		
2100	23.728	30.662	31.849	1.712		
2200	24.958	32.313	33.561			

Таблиця 4.2.1.5 «Ентальпії продуктів згоряння при концентрації кисню 29%»

Температура, °C	Г _п , МДж/м ³	Г _г , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	0.904	1.117	1.162	1.188	1.162	1.188
200	1.820	2.260	2.351	1.221	2.351	1.221
300	2.753	3.434	3.572	1.259	3.572	
400	3.703	4.646	4.831	1.293		
500	4.676	5.890	6.124	1.317		
600	5.672	7.158	7.441	1.359		
700	6.696	8.466	8.801	1.402		
800	7.726	9.816	10.202	1.426		
900	8.757	11.191	11.628	1.458		
1000	9.815	12.596	13.087	1.464		
1100	10.903	14.005	14.550	1.477		
1200	11.990	15.428	16.027	1.515		
1300	13.078	16.888	17.542	1.541		
1400	14.194	18.373	19.082	1.538		
1500	15.310	19.855	20.620	1.558		
1600	16.426	21.357	22.178	1.571		
1700	17.542	22.873	23.750	1.580		
1800	18.658	24.397	25.330	1.602		
1900	19.803	25.941	26.931	1.603		
2000	20.947	27.487	28.535	1.615		
2100	22.092	29.045	30.149	1.624		
2200	23.237	30.611	31.773			

4.2.2. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Розрахунок теплового балансу котельного агрегату і тепловий розрахунок топки при збагаченні дуттьового повітря киснем проводиться аналогічно базовому розрахунку, але з урахуванням змін складу повітря, що подається в топку. Результати теплового розрахунку котельного агрегату при збагаченні дуттьового повітря киснем наведені в таблицях А.1 та А.2 Додатку А.

Можна виділити такі отримані результати розрахунку теплового балансу:

- зменшуються втрати теплоти з димовими газами q_2 від 5,672% при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 4,344% при збагаченні до 29%;
- зростає ККД котла η від 93,418% при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 94,746% при збагаченні до 29%;
- зменшується витрата палива B від 31546 м³/год при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 31103 м³/год при збагаченні до 29%.

Із теплового розрахунку топки маємо:

- зростання адіабатної температури горіння від 2187°C при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 2662°C при збагаченні до 29%;
- зростання ступеня чорноти факела від 0,430 при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 0,502 при збагаченні до 29%;
- зростання ступеня чорноти топки від 0,557 при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 0,627 при збагаченні до 29%;
- зменшення температури газів на виході з топки від 1180°C при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 1067°C при збагаченні до 29%.

4.2.3. ПОЗОННИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

В результаті позонного розрахунку топки отримано температури на виході із кожної зони при збагаченні киснем дуттьового повітря. Для візуалізації зміни температур побудовано графік (рис. 4.2.3.1).

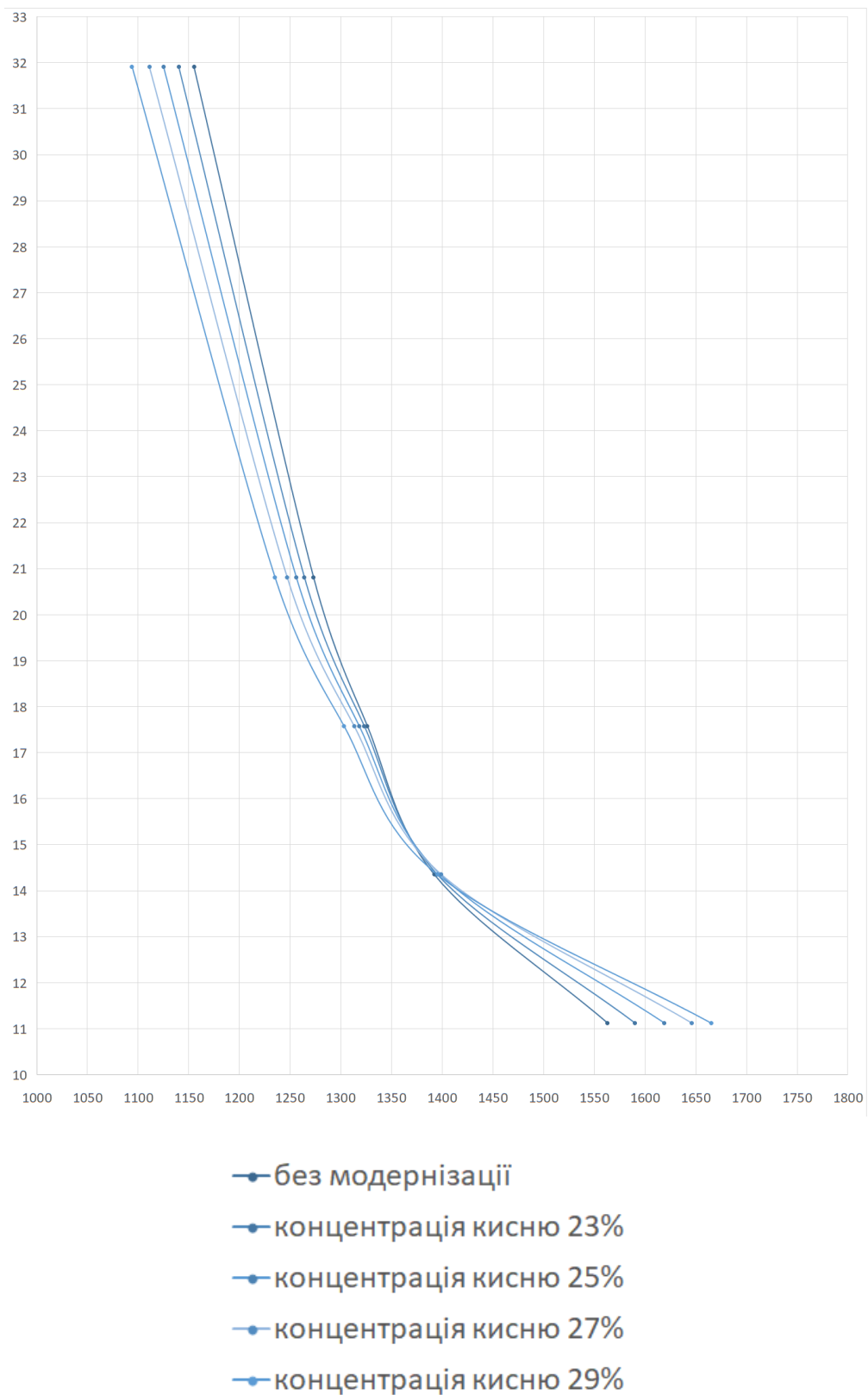


Рис. 4.2.3.1. Температура газів на виході із зон

Результат позонного теплового розрахунку топки зі збагаченням дугтьового повітря киснем наведені в таблицях А.3-А.8 Додатку А.

4.3. ДВОСТУПЕНЕВА СХЕМА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

В даному розділі наведені результати розрахунків двоступеневої схеми спалювання палива. Суть ступеневого спалювання полягає в тому, що на першій стадії спалювання наявний коефіцієнт надлишку повітря, менший за одиницю, а на другій – підвищується вміст окислювача в атмосферному повітрі понад стандартну його частку.

4.3.1. ОБ'ЄМИ І ЕНТАЛЬПІ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ

Кількість теоретично необхідного повітря, кількість азоту в повітрі та об'єми продуктів згоряння розраховуються аналогічно розділам 4.1 та 4.2.

Приймається до розрахунку коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0,9$. Таким чином на першій стадії спалювання утворюється недопал.

На другій стадії в топку вдувається збагачене киснем повітря. Розрахунок проводиться для 21, 23, 25, 27 та 29% кисню в дуттьовому повітрі.

Результат розрахунку продуктів згоряння при двоступеневій схемі спалювання наведено в таблиці 4.3.1.1.

Таблиця 4.3.1.1 «Коефіцієнти надлишку повітря і об'єми продуктів згоряння при двоступеневій схемі»

Величина, що розраховується	Розмірність	Концентрація кисню, %				
		21	23	25	27	29
Коеф. надлишку повітря $\alpha_{\text{ср}}$	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$V^0_{\text{с.пов.}} = (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0$	м ³ /м ³	-0.944	-0.862	-0.793	-0.734	-0.683
Дійсний об'єм водяних парів: $V_{\text{H}_2\text{O}} = V^0_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0161 (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0 =$ $= V^0_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0161 V^0_{\text{с.пов.}}$	м ³ /м ³	2.129	2.117	2.107	2.099	2.091
Дійсний сумарний об'єм продуктів згоряння: $V_{\text{r}} = V^0_{\text{RO}_2} + V^0_{\text{N}_2} + V^0_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha_{\text{ср}} - 1)V^0$	м ³ /м ³	9.661	8.909	8.277	7.739	7.275
Об'ємна доля триатомних газів: $\Gamma_{\text{RO}_2} = V^0_{\text{RO}_2} / V_{\text{r}}$	-	0.103	0.112	0.120	0.128	0.137
Об'ємна доля водяних парів: $\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = V^0_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{r}}$	-	0.222	0.239	0.256	0.273	0.289
Сумарна об'ємна частка триатомних газів: $\Gamma_{\text{r}} = \Gamma_{\text{RO}_2} + \Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	-	0.325	0.351	0.376	0.401	0.426

Значення ентальпій продуктів згоряння для відповідних значень концентрацій кисню наведені в таблицях Б.1-Б.5 Додатку Б.

4.3.2. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Розрахунок теплового балансу котельного агрегату і тепловий розрахунок топки при двоступеневій схемі спалювання палива проводиться аналогічно розділам 4.1 та 4.2 з урахуванням змін складу повітря, що подається в топку. Результати теплового розрахунку котельного агрегату при двоступеневій схемі спалювання наведені в таблицях Б.6 та Б.7 Додатку Б.

Можна виділити такі отримані результати розрахунку теплового балансу:

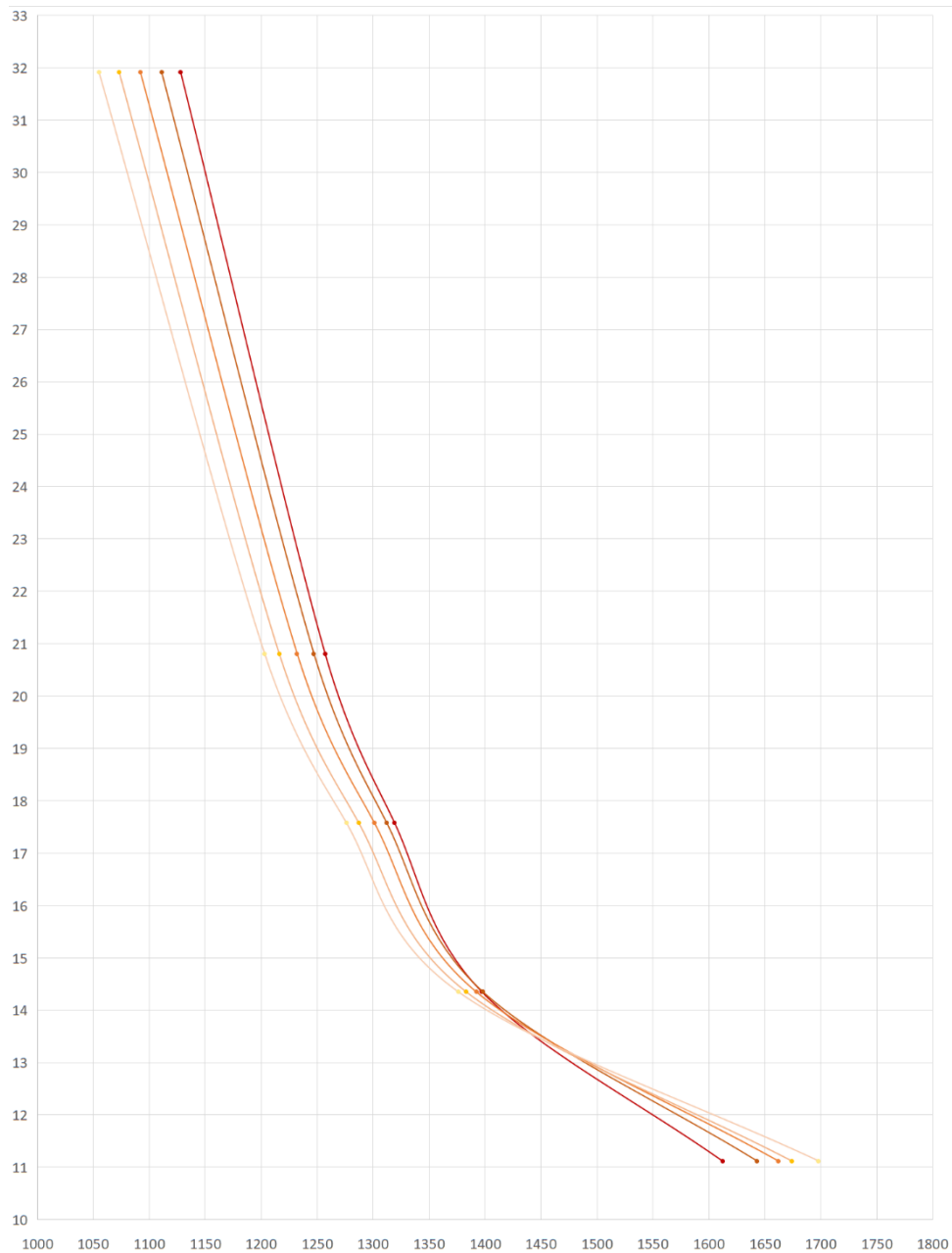
- зменшуються втрати теплоти з димовими газами q_2 від 5,001% тільки при недопалі (21% O_2) до 3,864% при ступеневому спалюванні (29% O_2);
- зростає ККД котла η від 94,089% тільки при недопалі (21% O_2) до 95,226% при ступеневому спалюванні (29% O_2);
- зменшується витрата палива V від 31321 м³/год тільки при недопалі (21% O_2) до 30947 м³/год при ступеневому спалюванні (29% O_2).

Із теплового розрахунку топки маємо:

- зростання адіабатної температури горіння від 2406°C тільки при недопалі (21% O_2) до 2920°C при ступеневому спалюванні (29% O_2);
- зростання ступеня чорноти факела від 0,464 тільки при недопалі (21% O_2) до 0,540 при ступеневому спалюванні (29% O_2);
- зростання ступеня чорноти топки від 0,592 тільки при недопалі (21% O_2) до 0,663 при ступеневому спалюванні (29% O_2);
- зменшення температури газів на виході з топки від 1135°C тільки при недопалі (21% O_2) до 986°C при ступеневому спалюванні (29% O_2).

4.3.3. ПОЗОННИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКОВОЇ КАМЕРИ

В результаті позонного розрахунку топки отримано температури на виході із кожної зони при двоступеневому спалюванні палива. Для візуалізації зміни температур побудовано графік (рис. 4.3.3.1).



- недопал без збагачення киснем
- недопал з концентрацією кисню 23%
- недопал з концентрацією кисню 25%
- недопал з концентрацією кисню 27%
- недопал з концентрацією кисню 29%

Рис. 4.3.3.1 Температура газів на виході із зон

Результат позонного теплового розрахунку топки при двоступеневій схемі спалювання наведені в таблицях Б.8-Б.13 Додатку Б.

5. УСТАНОВКА ДЛЯ МЕМБРАННОГО РОЗДІЛЕННЯ ПОВІТРЯ

Збагачення киснем атмосферного повітря, що подається в топку, пропонується здійснювати шляхом видобування кисню на самому підприємстві. На основі аналізу доступних на сьогодні методів отримання кисню для даного випадку доречно виділити використання мембранних технологій.

Мембранні кисневі установки дозволяють отримати кисень чистотою до 45%. Застосування таких систем є ефективним з економічної точки зору. Крім того, цього вистає, щоб закрити потребу у збагаченні дугтьового повітря киснем для енергетичних парогенераторів.

Виконання установки може бути стаціонарним або мобільним, відкритим або в блок-боксі.

Установка повністю автоматизована, є можливість ручного і дистанційного управління.

Технічні характеристики мембранної установки наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 «Технічні характеристики мембранної установки»

Величина	Показник
Продуктивність, м ³ /год	до 10 000
Чистота кисню, %	до 45
Тиск, МПа	0,1
Температура точки роси, °С	-60...-70
Умови експлуатації, °С	+5...+40
Ресурс роботи мембранних модулів, тис. год	до 180

Суть роботи мембранної установки полягає в селективній проникності матеріалу мембрани різними компонентами газової суміші. З метою очищення повітря фільтрується, стискається до необхідного рівня, осушується та подається на мембранний модуль. Більш швидкі молекули кисню проходять через полотно мембрани (рис. 5.1) та збираються в окремому газгольдері. Сучасна газорозділювальна мембрана як основний елемент установки являє собою пустотіле волокно. Пустотіла волоконна мембрана складається із пористого полімерного волокна із нанесеним на його зовнішню поверхню

газорозділювальним шаром. Чистота отриманих газів визначається кількістю модулів, через які проходить повітря.

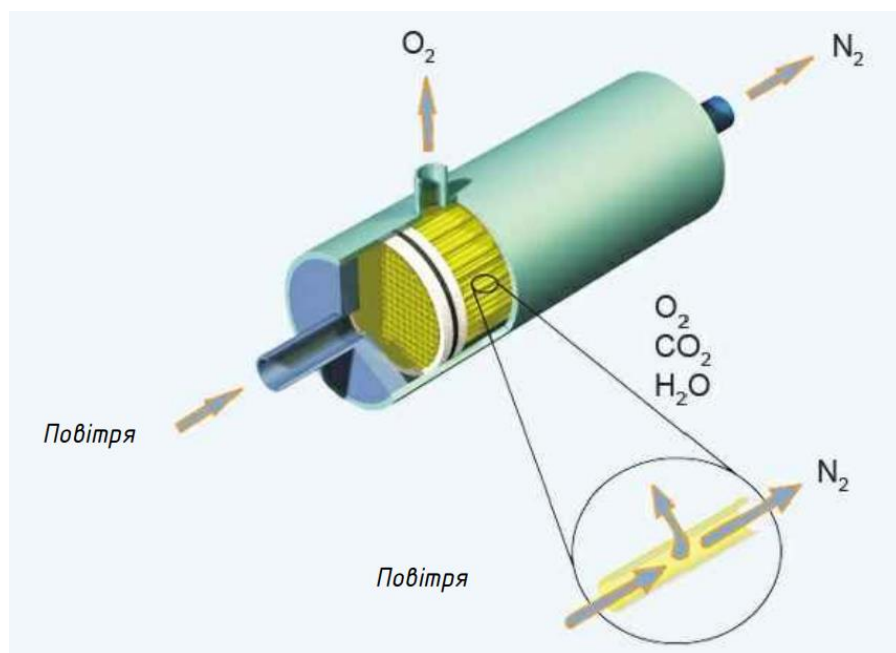


Рис. 5.1 Газорозділювальний картридж.

В даній роботі до розрахунку прийнятий варіант подачі збагаченого киснем дугтьового повітря в топку через пальники, тобто в камеру згорання. Установа приєднується паралельно. Потік повітря після повітропідігрівача входить в установку, повітря проходить крізь мембранний блок, далі повітропровід зі збагаченим дугтьовим повітрям приєднується перед дугтьовим вентилятором.

Також розроблено схему подачі збагаченого киснем повітря, котре подається в камеру охолодження крізь існуючі технологічні отвори в екранних стінах топки. Розмір технологічних отворів по кресленню складає $\sim 0,06 \text{ м}^2$. В такому випадку в установку заходить повітря після повітропідігрівача, проходить мембранні модулі і дугтьовим вентилятором меншої потужності подається в топку. Регулювання подачі повітря здійснюється шиберами на приєднаннях до технологічних отворів.

6. РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ СО ТА NO_x

6.1. ПЕРЕРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

У методиці [29] для визначення величин викидів та питомого об'єму використовуються масові характеристики палива – масовий елементний склад, масова теплота згоряння, маса використаного палива. Тому для газоподібного палива об'ємні характеристики необхідно перерахувати в масові.

Питома маса кожного індивідуального газу в сухому стані газоподібного палива визначається за формулами:

$$m_{\text{CH}_4} = 0,716 \cdot 0,01(\text{CH}_4)_v = 0,716 \cdot 0,01 \cdot 98,5 = 0,70526 \text{ кг/нм}^3 \quad (6.1.1)$$

$$m_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1,342 \cdot 0,01(\text{C}_2\text{H}_6)_v = 1,342 \cdot 0,01 \cdot 0,2 = 0,002684 \text{ кг/нм}^3 \quad (6.1.2)$$

$$m_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1,967 \cdot 0,01(\text{C}_3\text{H}_8)_v = 1,967 \cdot 0,01 \cdot 0,1 = 0,001967 \text{ кг/нм}^3 \quad (6.1.3)$$

$$m_{\text{N}_2} = 1,25 \cdot 0,01(\text{N}_2)_v = 1,25 \cdot 0,01 \cdot 1 = 0,0125 \text{ кг/нм}^3 \quad (6.1.4)$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1,964 \cdot 0,01(\text{CO}_2)_v = 1,964 \cdot 0,01 \cdot 0,2 = 0,003928 \text{ кг/нм}^3 \quad (6.1.5)$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм³ сухого палива, кг/нм³;

$(i)_v$ – об'ємний вміст i -го індивідуального газу, %.

Густина сухого газоподібного палива ρ_n , кг/нм³, при нормальних умовах визначається як сума питомих мас індивідуальних газів, що входять до складу палива:

$$\rho_n = \sum m_{\text{C}_p\text{H}_q} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{CO}_2} \quad (6.1.6)$$

$$\rho_n = 0,70526 + 0,002684 + 0,001967 + 0,0125 + 0,003928 = 0,726 \text{ кг/нм}^3$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм³ сухого палива при нормальних умовах, кг/нм³;

$m_{\text{C}_p\text{H}_q}$ – питома маса вуглеводню C_pH_q , який складається з p атомів вуглецю та q атомів водню при нормальних умовах, кг/нм³.

Масовий елементний склад сухого газоподібного палива визначається за формулами:

$$C^{daf} = \frac{100}{\rho_H} \left(\sum \frac{12p}{12p+q} m_{CpHq} + 0,429m_{CO} + 0,273m_{CO_2} \right) \quad (6.1.7)$$

$$C^{daf} = 100/0,726(0,75*0,70526+0,8*0,002684+0,818*0,001967+0,273*0,003928) = 73,488 \%$$

$$H^{daf} = \frac{100}{\rho_H} \left(\sum \frac{q}{12p+q} m_{CpHq} + 0,059m_{H_2S} \right) \quad (6.1.8)$$

$$H^{daf} = 100/0,726(0,25*0,70526+0,2*0,002684+0,182*0,001967) = 24,398 \%$$

$$N^{daf} = \frac{100}{\rho_H} m_{N_2} \quad (6.1.9)$$

$$N^{daf} = 100/0,726*0,0125 = 1,721 \%$$

$$O^{daf} = \frac{100}{\rho_H} (0,571m_{CO} + 0,727m_{CO_2}) \quad (6.1.10)$$

$$O^{daf} = 100/0,726(0,727*0,003928) = 0,393 \%$$

де C^{daf} – масовий вміст вуглецю в паливі на горючу масу, %;

H^{daf} – масовий вміст водню в паливі на горючу масу, %;

N^{daf} – масовий вміст азоту в паливі на горючу масу, %;

S^{daf} – масовий вміст сірки в паливі на горючу масу, %;

O^{daf} – масовий вміст кисню в паливі на горючу масу, %;

ρ_H – густина сухого газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³;

m_i – питома маса і-го індивідуального газу в 1 нм³ сухого газоподібного палива, кг/нм³.

6.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ СУХИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Питомий об'єм сухих димових газів, які утворюються під час повного згоряння палива, визначається на підставі даних про масовий елементний склад

робочої маси палива та витрати повітря для його спалювання відповідно до стехіометричних співвідношень між паливом та повітрям.

Під час неповного згоряння палива утворюється хімічний недопал, внаслідок чого до викидів потрапляють горючі речовини, головним чином вуглець.

Масовий вміст вуглецю $C^{взг}$, який згоряє, % на робочу масу, виражається через масовий вміст вуглецю в паливі C^r за формулою:

$$C^{взг} = \varepsilon_c C^r = 0,995 * 73,488 = 73,12 \%, \quad (6.2.1)$$

де ε_c – ступінь окислення вуглецю палива;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %.

Ефективність процесу горіння визначає ступінь окислення вуглецю палива ε_c . При повному згорянні палива ступінь окислення дорівнює одиниці, але за наявності недогоряння палива його значення зменшується.

Для природного газу рекомендоване значення ε_c становить 0,995.

Під час спалювання 1 кг робочої маси палива з урахуванням механічного недопалювання питомий об'єм сухих димових газів, $\text{нм}^3/\text{кг}$ (за відсутності в них кисню) визначається за формулою [28]:

$$v_{дг}^0 = 0,01(1,866C^{взг} + 0,7S^r + 0,8N^r) + v_{N_2\text{пов}} \quad (6.2.3)$$

де $C^{взг}$ – масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

N^r – масовий вміст азоту в паливі на робочу масу, %;

$v_{N_2\text{пов}}$ – питомий об'єм азоту повітря, необхідного для горіння палива, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм азоту, $\text{нм}^3/\text{кг}$, в повітрі, яке необхідне для спалювання палива, визначається за формулою:

$$v_{N2пов} = 3,762 v_{O2}, \quad (6.2.4)$$

де v_{O2} – питомий об'єм кисню, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм кисню, $\text{нм}^3/\text{кг}$, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення:

$$v_{O2} = 0,01(1,866C^{взг} + 5,56H^r + 0,7S^r - 0,7O^r), \quad (6.2.5)$$

де $C^{взг}$ – масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

H^r – масовий вміст водню в паливі на робочу масу, %;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

O^r – масовий вміст кисню в паливі на робочу масу, %.

Константи в рівняннях (6.12) – (6.14) є стереометричними множниками.

$$v_{O2} = 0,01(1,866*73,12 + 5,56*24,398 - 0,7*0,393) = 2,72 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

$$v_{N2пов} = 3,762*2,72 = 10,226 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

$$v_{дг}^o = 0,01(1,866*73,12 + 0,8*1,721) + 10,227 = 11,605 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Одержане значення $v_{дг}^o$ за відсутності кисню в димових газах (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$) може бути приведене до стандартного вмісту кисню в димових газах, наприклад, до 3 %, за допомогою рівняння (для 21% кисню в дугтьовому повітрі):

$$v_{дг} = v_{дг}^o \frac{21}{21 - O_{2ст}} \quad (6.2.6)$$

$$v_{дг} = 11,605*21/(21-3) = 13,539 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

де $v_{дг}$ – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до стандартного вмісту кисню в димових газах, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

$v_{дг}^o$ – питомий об'єм сухих димових газів при $O_2 = 0\%$, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

$O_{2ст}$ – стандартний об'ємний вміст кисню в сухих димових газах, %.

6.3. РОЗРАХУНОК ВАЛОВИХ ВИКИДІВ СО ТА NO_x

Показник емісії оксидів азоту kNO_x, г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується як

$$k_{NO_x} = (k_{NO_x})_0 f_H (1 - \eta_I) (1 - \eta_{II} \beta), \quad (6.3.1)$$

$$k_{NO_x} = 100 * (200/250)^{1,25} * (1 - 0,3) = 52,96 \text{ г/ГДж},$$

де $(k_{NO_x})_0$ - показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж;

f_H - ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні;

η_I - ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду;

η_{II} - ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки);

β - коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Валовий викид j -ї забруднювальної речовини E_j , т, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, у тому числі під час їх одночасного спільного спалювання:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r)_i, \quad (6.3.2)$$

$$E_{NO_x} = 10^{-6} * 52,96 * 199519,6 * 49,16 = 519,5 \text{ т/рік},$$

$$E_{CO} = 10^{-6} * 17 * 199519,6 * 49,16 = 166,75 \text{ т/рік},$$

де E_{ji} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{ji} – показник емісії j -ї забруднювальної речовини для i -го палива, г/ГДж;

B_i – витрата i -го палива за проміжок часу P , т;

$(Q_i^r)_i$ – нижча робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Результати розрахунків викидів СО та NO_x наведені в таблицях 6.3.1 і 6.3.2.

Таблиця 6.3.1 «Викиди CO та NOx при збагаченні дуттьового повітря киснем»

Величина, що розраховується	Концентрація кисню, %				
	21	23	25	27	29
Витрата палива, м ³ /год	31546	31405	31288	31189	31103
Річна витрата палива, м ³	276342960	275107800	274082880	273215640	272462280
Маса використаного палива, т	199519.6	198627.8	197887.8	197261.7	196717.8
Масова нижча теплота згоряння, МДж/кг	49.16				
Масовий вміст вуглецю, %	73.12				
Питомий об'єм сухих димових газів, нм ³ /кг	11.605				
Значення питомого об'єму сухих димових газів, приведене до ст. вмісту кисню	16.29	15.74	15.31	14.96	14.67
Узагальнений показник емісії C _{NOx} , г/ГДж	100				
Узагальнений показник емісії C _{CO} , г/ГДж	17				
Показник емісії k _{NOx} , г/ГДж	52,96				
Валовий викид E _{NOx} , т/рік	519,50	517,18	515,25	513,62	512,21
Валовий викид E _{CO} , т/рік	166,75	166,01	165,39	164,87	164,41

Таблиця 6.3.2 «Викиди CO та NOx при двоступеневій схемі спалювання палива»

Величина, що розраховується	Концентрація кисню, %				
	21	23	25	27	29
Витрата палива, м ³ /год	31321	31202	31103	31019	30947
Річна витрата палива, м ³	274371960	273329520	272462280	271726440	271095720
Маса використаного палива, т	198096.6	197343.9	196717.8	196186.5	195731.1
Масова нижча теплота згоряння, МДж/кг	49.16				
Масовий вміст вуглецю, %	73.12				
Питомий об'єм сухих димових газів, нм ³ /кг	11.605				
Значення питомого об'єму сухих димових газів, приведене до ст. вмісту кисню	16.29	15.74	15.31	14.96	14.67
Узагальнений показник емісії C _{NOx} , г/ГДж	100				
Узагальнений показник емісії C _{CO} , г/ГДж	17				
Показник емісії k _{NOx} , г/ГДж	52,96				
Валовий викид E _{NOx} , т/рік	515,80	513,84	512,21	510,82	509,64
Валовий викид E _{CO} , т/рік	165,56	164,94	164,41	163,97	163,59

7. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проведене дослідження збагачення дуттьового повітря киснем і впровадження двоступеневої схеми спалювання палива показало:

1. Азот є баластом в процесі горіння. Кисень, котрим збагачується дуттьове повітря, витісняє молекули азоту (рис. 7.1), тим самим зменшуючи загальну кількість продуктів згоряння.

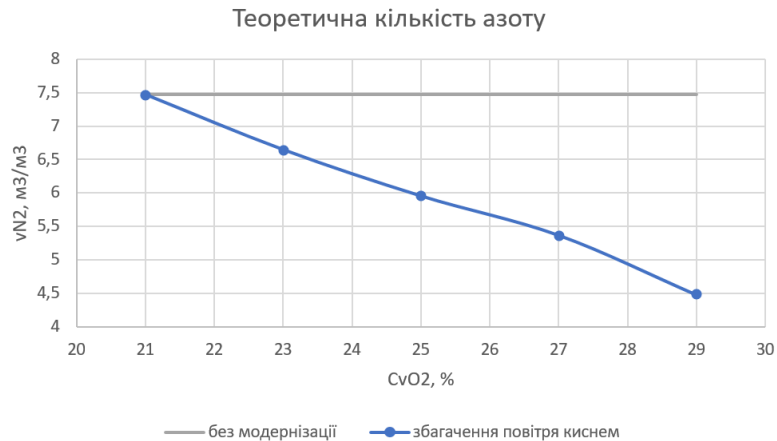


Рис. 7.1 Залежність теоретичної кількості азоту від концентрації кисню в дуттьовому повітрі.

2. Збагачення повітря киснем призводить до збільшення об'ємних долей трьохатомних газів RO₂ (рис. 7.2) і водяних парів H₂O (рис. 7.3) у відхідних газах, відповідно збільшується їх парціальний тиск. Це пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів.

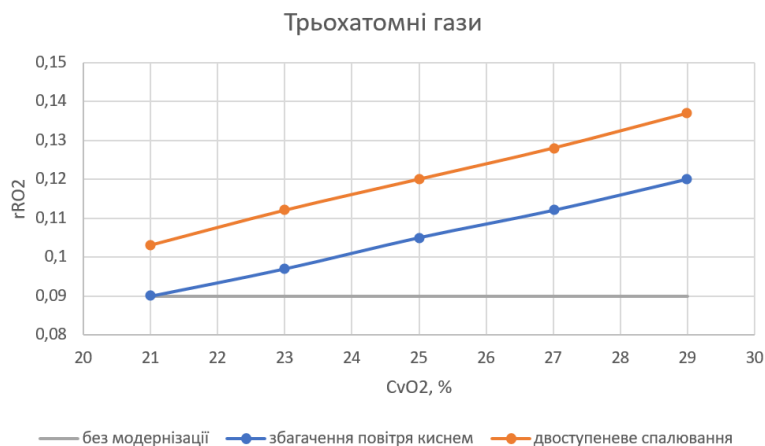


Рис. 7.2 Значення RO₂ в результаті модернізації котла.

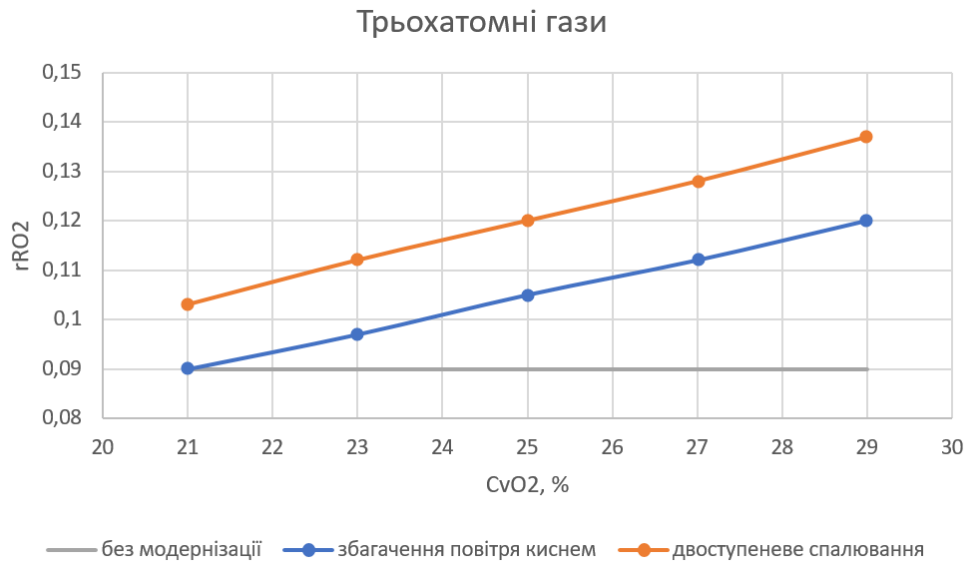


Рис. 7.3 Значення H_2O в результаті модернізації котла.

- Під час роботи котла неминуче відбуваються втрати теплоти. Найбільшу частку з них складають втрати теплоти з димовими газами q_2 . При збагаченні киснем дуттьового повітря, температура димових газів на виході з топки зменшується, що вказує на підвищення засвоєння теплоти екранами топки (рис. 7.4).

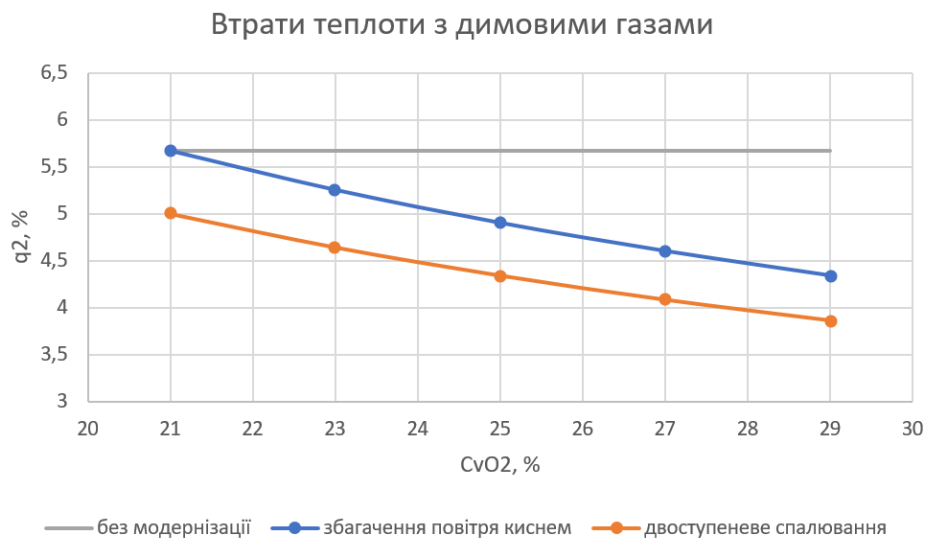


Рис. 7.4 Значення q_2 в результаті модернізації котла.

- Зменшення втрат теплоти з димовими газами безпосередньо впливає на зростання ККД котла (рис. 7.5).

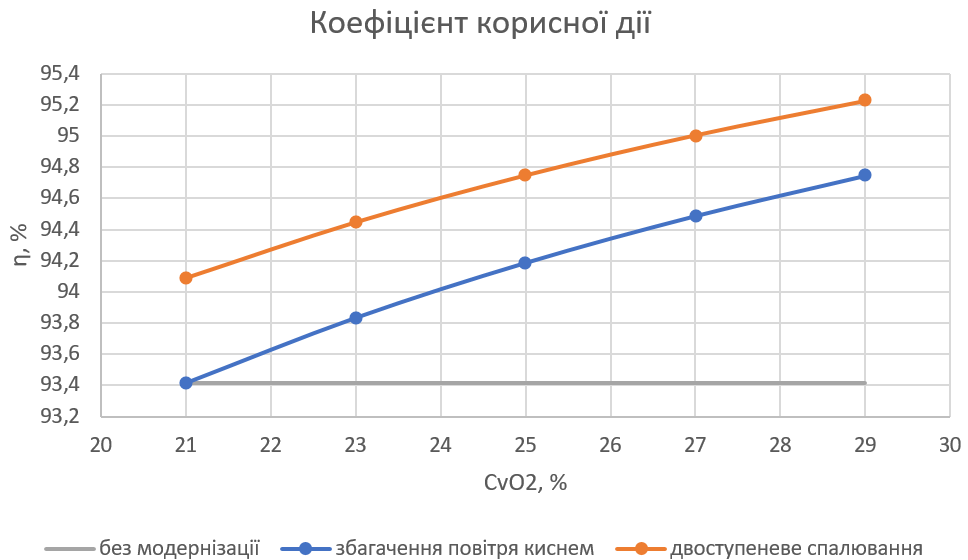


Рис. 7.5 Значення ККД в результаті модернізації котла.

5. Зменшується витрата палива V , м³/год (рис. 7.6). Оскільки витрати палива повинна забезпечувати отримання необхідної кількості корисної теплоти, а також поповнення теплових втрат, що супроводжують роботу котельної установки, зменшення витрати палива відбувається через зменшення теплових втрат з димовими газами, тобто при збільшенні ККД котла.

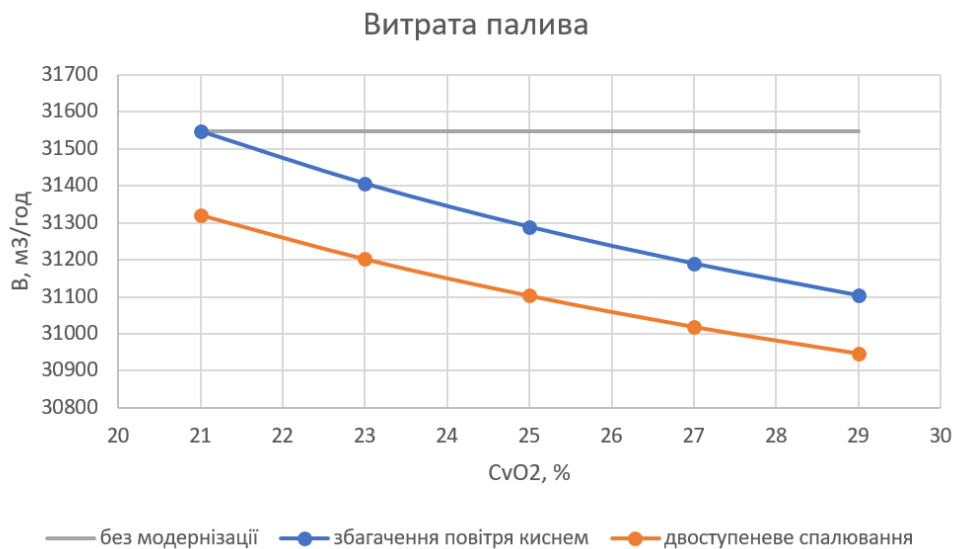


Рис. 7.6 Значення витрати палива в результаті модернізації котла.

6. Припускається, що вдування кисню в камеру охолодження впливає на адіабатичну температуру горіння. Похибка у розрахунках не вплинула би суттєво на результат, адже зберігається тенденція зниження адіабатичної

температура горіння, що обумовлено зменшенням об'єму продуктів згоряння:

- від 2187 °С при стандартному вмісті кисню в дуттьовому повітрі до 2662 °С при концентрації кисню в дуттьовому повітрі 29%;
- від 2406 °С до 2920 °С при впровадженні двоступеневої схеми спалювання палива.

7. Знижується температура газів на виході з топки (рис. 7.7). Причини:

- зменшення витрати палива V , м³/год (зменшуються теплові втрати з вихідними газами q_2 , %);
- зростання ступеню чорноти топки a_T (зростають об'ємні долі трьохатомних газів і водяних парів).

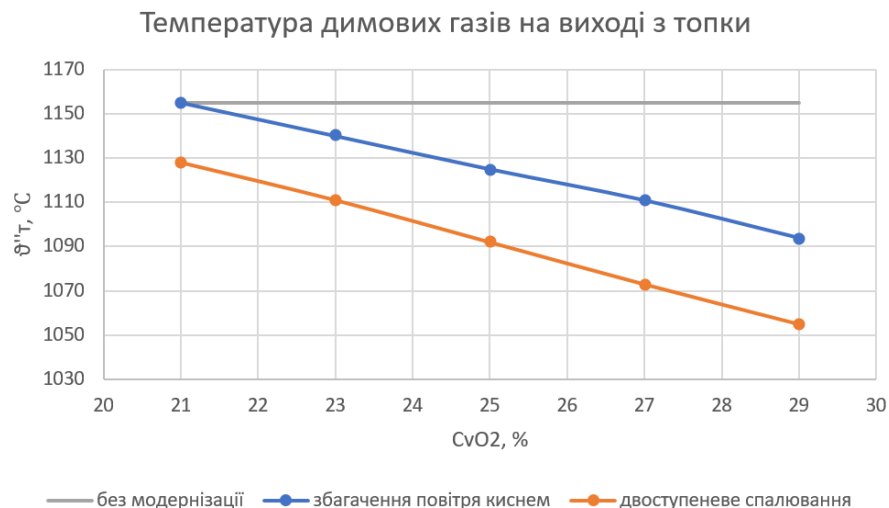


Рис. 7.7 Значення температури димових газів на виході з топки в результаті модернізації котла.

8. З контрольованим хімічним недопалом палива ми позбулись надлишку повітря в топці α . Внаслідок цього зменшилась концентрація оксидів азоту NO_x, утворених в процесі горіння і, як наслідок, зменшується валовий викид NO_x (рис. 7.8).

Надлишок повітря α зменшується до критичних значень, при якому з'являється хімічний недопал, тобто спостерігається поява СО в продуктах згоряння (рис. 7.9). Зі збагаченням дуттьового повітря киснем посилюється

процес спалювання палива, що виключає утворення хімічного недопалу q_3 шляхом доокиснення оксиду вуглецю CO в двоокис CO₂.

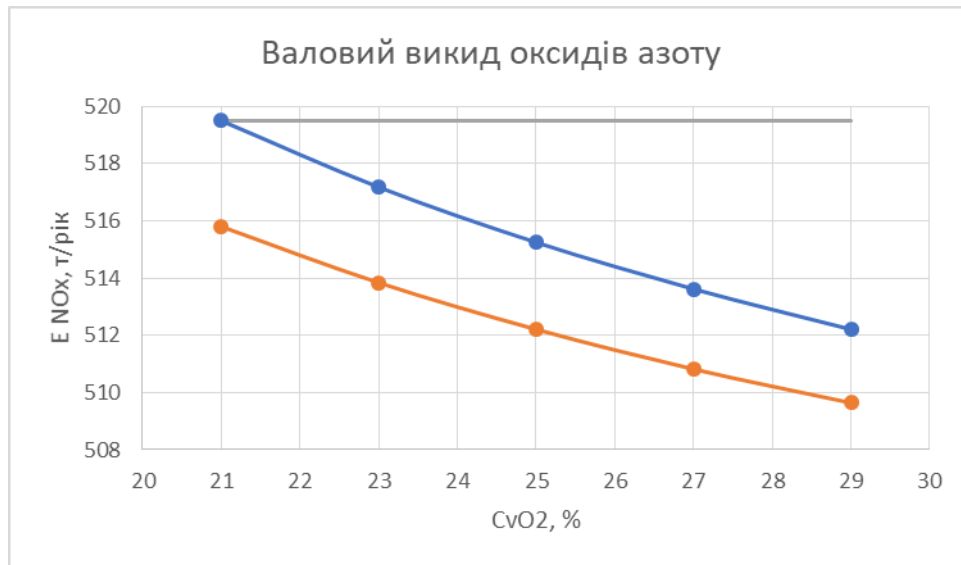


Рис. 7.8 Значення валового викиду NOx в результаті модернізації котла.

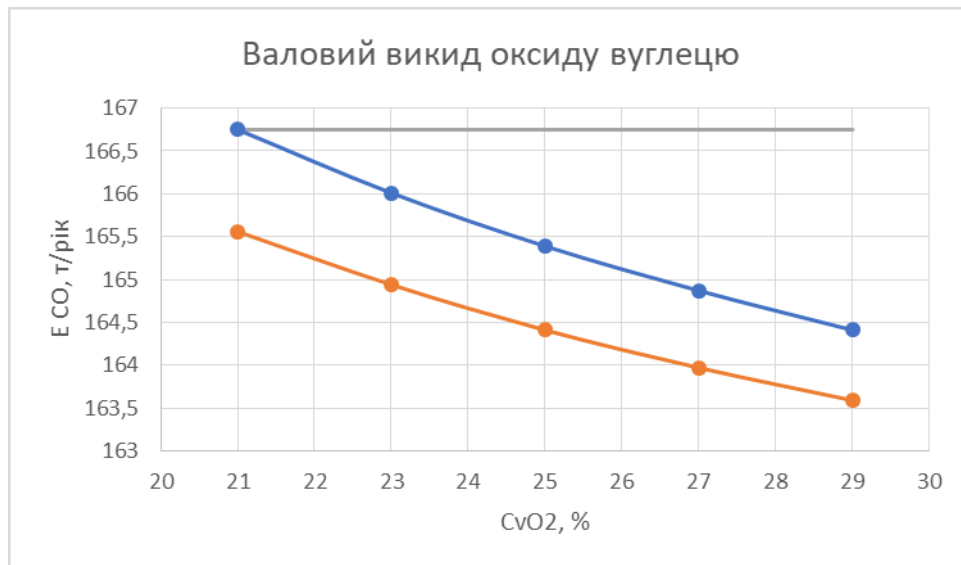


Рис. 7.9 Значення валового викиду CO в результаті модернізації котла.

ВИСНОВКИ

Робота виконана з актуальної проблеми для енергетичних об'єктів країни, яка пов'язана із необхідністю підвищення енерго-екологічних показників експлуатації потужних енергетичних котлів на енергетичних об'єктах.

Стан енергетичних об'єктів України не відповідає екологічним вимогам і не задовольняє вимогам енергоефективності в цілому. Значна частина устаткування ТЕЦ та ТЕС майже вичерпала свій ресурс і мала б бути виведена з експлуатації.

Із міркувань економічної ефективності пропонується модернізація котельних установок без глибокої реконструкції топки. Таким засобом модернізації вітчизняних котельних установок може бути збагачення дуттьового повітря киснем.

Тепловий розрахунок топки парогенератора ТП-87, що працює на газі, дав такі результати:

Підвищення концентрації кисню в дуттьовому повітрі призводить до зміни складу топкового середовища та його теплофізичних характеристик. Зменшується кількість теоретично необхідного повітря для спалювання палива, відповідно, зменшується вміст азоту в повітрі, що подається в топку. В складі топкового середовища збільшується об'ємна частка трьохатомних газів та водяної пари. Внаслідок цього інтенсифікуються теплообмінні процеси в топці котла, а отже збільшується поглинання теплоти екранними поверхнями топки. Зменшується кількість димових газів та їх температура на виході з топки, і, очевидно, на виході з котла.

Це безпосередньо впливає на зменшення втрат теплоти з димовими газами, котрі чинять найбільший вплив на значення коефіцієнту корисної дії котельного агрегату, і призводять до його зростання.

Існує деяка оптимальна концентрація кисню, перевищення якої не призводить до суттєвих позитивних змін в роботі котла.

До підвищення коефіцієнту корисної дії також призводить можливість мінімізувати втрати теплоти з хімічним недопалом. Досягти цього можливо зменшивши коефіцієнт надлишку повітря в топці.

Спалювання природного газу з помірним недопалом дозволяє знизити генерацію викидів оксидів азоту NO_x . А впровадження режиму спалювання з недопалом не тягне за собою значних витрат, оскільки легко можуть бути реалізовані на котлі в результаті налагоджувальних випробувань.

Організація багатоступеневого спалювання палива сприяє підвищенню ефективності процесів спалювання. Крім того, впровадження двоступеневої схеми суттєво знижує викиди згенерованих оксидів азоту на першому ступені та виключає викид оксиду вуглецю на другому ступені, завдяки доокисненню в двоокис.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 No 796-р. // Урядовий кур'єр від 30.11.2017 –No 226.
2. TheEnergyCommunityTreaty. Official Journal of the European Union, L 198, 2006. –P.18-37.
URL:https://mzheks.net/repository/docs/treaty_establishing_energy_community_in_the_see.pdf.
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) (Text with EEA relevance), Official Journal of the European Communities, 17/12/2010, L334, P. 17-119.
4. POLICY GUIDELINES by the Energy Community Secretariat on the Preparation of National Emission Reduction Plans, PG 03/2014/19 Dec 2014.
URL:http://www.energy-community.org/.../PG_03_2014_ECS_NERPs.pdf.
5. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, Україна, 2021р.) Стан та перспективи виконання національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. І. А. Вольчин, Л. С. Гапонич.
6. Ткаченко С. Й. Екологічні аспекти виробництва енергії: навчальний посібник / С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар; ВНТУ. – Вінниця: ВНТУ, 2017.
7. Науковий вісник НЛТУ України, 2017, т. 27, № 6. Підвищення ефективності спалювання органічного палива в комбінованих парогазових енергетичних установках. М. П. Кулик, Т. Ю.Кравець
8. Nov. 11, 1856: Bessemer Becomes the Man of Steel. URL:
<https://www.wired.com/2010/11/nov-11-1856-bessemer-becomes-the-man-of-steel-2>

9. Установка короткоциклової адсорбції (КЦА). URL: <https://cutt.ly/9bOXloo>
10. Мембранні кисневі установки. URL: <https://cutt.ly/qbOXPM3>
11. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва/ Л.Н. Хитрин. –М.: МГУ, 1957. - 442с.
12. Достияров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. док. техн. наук: 05.14.04 / Достияров А.М - г.Алматы: КазНИИ Энергетики им. Чокина, 2000. - 237с.
13. Зельдович Я.Б. Окисление азота при горении/ Я.Б. Зельдович. П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий - М. Изд-во Наука,1947. - 146с.
14. Умышев Д.Р. Разработка и исследование камеры сгорания ГТУ с пониженным образованием токсичных веществ :дис. на соискание степени док. философии. 6D071700 «Теплоэнергетика» / Д. Р. Умышев. – А., 2017. – 139 с.
15. Колієнко А.Г. Вплив рециркуляції продуктів згорання на основні характеристики процесу горіння / А.Г. Колієнко, О.А. Шило // Тези 70-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 23 квітня – 18 травня 2018 р.). – Полтава : ПолтНТУ, 2018. – Т. 3. – С. 128–129.
16. Зозуля С.Ю. Снижение выбросов оксидов азота путем впрыска влаги в зону горения / Зозуля С.Ю., Жихар Г.И. // Актуальные проблемы энергетики. – 2016.
17. Росляков, П.В.; Ионкин, И. Л.; Плешанов, К.А. Эффективное сжигание топлив с контролируемым химическим недожогом. «Теплоэнергетика», 2009, 1: 20-23.
18. Росляков, П.В.; Плешанов, К.А. Результаты внедрения сжигания топлива на котлах с умеренным контролируемым химическим недожогом. Сборник научных трудов «SWorld», 2012, 10.3: 33-40.

19. Ратников, П. Э. Оптимизация топливно-кислородных режимов сжигания газообразного топлива в теплогенерирующих установках / П. Э. Ратников, Д. В. Менделев // *Металлургия : республик. межведомст. сб. науч. тр.*, Минск, 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2011. – Вып. 33, ч. 1. – С. 86–100.
20. Технично-экономическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности / П.Э. Ратников, Д.В. Менделев, И.А. Трусова, С.М. Кабишов. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Серия «Энергетика»*. 2013. № 6. С. 52–58.
21. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова и др. *Энергоэффективность*. 2013. № 1. С. 32–34.
22. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, Г.А. Румянцева. *Энергоэффективность*. 2013. № 12. С. 36–38.
23. Мищенко М.В., Маслов В.А., Дзюбенко О.Л. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом. *Современные научные исследования и инновации*. 2011. № 7.
24. Гламаздин, П. М. Снижение уровня вредных выбросов в атмосферу от котлов на органическом топливе путем модифицирования дутьевого воздуха / П. М. Гламаздин, А. А. Дяченко // *Химическая технология и техника: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов*, Минск, 31 января - 12 февраля 2022 г. - Минск : БГТУ, 2022. – С. 259-262.
25. Гламаздин, П.М.; Дяченко, А.А. Збагачення киснем дуттєвого повітря для підвищення енергоефективності енергетичних

- парогенераторів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) №4 2021. С. 178-185. 2021.
26. Кишман К.А. Підвищення екологічних характеристик енергетичних парогенераторів шляхом збагачення киснем дуттьового повітря. International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2023". December 2023, Kyiv, Ukraine.
 27. Ліпов Ю. М. Позонний тепловий розрахунок топкової камери.// Промышленная теплотехника -1973,– № 1. – С. 1–5.
 28. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В.Кузнецова и др., М., «Энергия», 1973. – 296 с. с ил.
 29. ГКД 34.02.305-2002 Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 «Тепловий баланс при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Теплотворна здатність палива	Q_p^p	ккал/м ³	8480	8480	8480	8480
Температура димових газів	ϑ_{yx}	°С	160	160	160	160
Ентальпія димових газів	I_{yx}	ккал/м ³	542.62	505.99	474.79	447.89
Температура холодного повітря	$t_{x.v.}$	°С	30	30	30	30
Ентальпія холодного повітря	$I_{x.v.}^o$	ккал/м ³	92.49	86.02	80.50	75.74
Втрати теплоти від хімічного недопалу	q_3	%	0.5	0.5	0.5	0.5
Втрати теплоти з димовими газами	q_2	%	5.254	4.902	4.602	4.344
Втрати теплоти в навколишнє середовище	q_5	%	0.41	0.41	0.41	0.41
Сума втрат теплоти	Σq_i	%	6.16	5.81	5.51	5.25
ККД	η	%	93.836	94.188	94.488	94.746
Тиск перегрітої пари	$p_{пп}$	кгс/см ²	140	140	140	140
Температура перегрітої пари	$t_{пп}$	°С	560	560	560	560
Ентальпія перегрітої пари	$i_{пп}$	ккал/кг	833.2	833.2	833.2	833.2

Продовження таблиці А.1 «Тепловий баланс при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Температура живильної води	$t_{пв}$	°С	230	230	230	230
Ентальпія живильної води	$i_{пв}$	ккал/кг	238.2	238.2	238.2	238.2
Паропродуктивність котла	$D_{розр}$	кг/год	420000	420000	420000	420000
Тепло, що корисно використовується в котлоагрегаті	$Q_{ка}$	ккал/год	249900000	249900000	249900000	249900000
Повна витрата палива	B_p	м ³ /год	31405	31288	31189	31103
Коефіцієнт збереження теплоти	φ	-	0.9956	0.9957	0.9957	0.9957

Таблиця А.2 «Топка при різних концентраціях кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Коефіцієнт надлишку повітря в топці	α_T	-	1.05	1.05	1.05	1.05
Температура гарячого повітря	$t_{г.в.}$	°C	400	400	400	400
Ентальпія гарячого повітря	$I_{г.в.}^0$	ккал/кг	1115.09	1025.88	949.89	884.38
Тепло, що вноситься повітрям в топку	Q_B	ккал/кг	1170.84	1077.18	997.39	928.60
Корисне тепловиділення в топці	Q_T	ккал/кг	9608.44	9514.78	9434.99	9366.20
Теоретична температура горіння	ϑ_a	°C	2313	2433	2549	2662
Відносне розташування максимуму температур по висоті топки	x_T	-	0.159	0.159	0.159	0.159
Параметр	M	-	0.48	0.48	0.48	0.48
Температура газів на виході з топки	ϑ''_T	°C	1200	1200	1200	1200
Ентальпія газів на виході з топки	I''_T	ккал/м ³	4601.77	4302.48	4047.52	3827.73
Середня сумарна теплоємність продуктів згорання	$V_{ср}$	ккал/(м ³ *°C)	4.50	4.23	3.99	3.79
Добуток	$p_{пS}$	(м*кгс)/см ²	1.77	1.91	2.03	2.16

Продовження таблиці А.2 «Топка при різних концентраціях кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	$1/(м*кгс/см^2)$	0.336	0.330	0.326	0.322
Оптична товщина	k_{ps}	-	0.596	0.630	0.663	0.696
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.449	0.467	0.485	0.502
Коефіцієнт теплової ефективності екранів	$\Psi_{\text{экр}}$	-	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
Коефіцієнт, що враховує забруднення ширм, що розташовані у вихідному вікні топки	$\zeta_{ок}$	-	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705
Коефіцієнт теплової ефективності ширм, розташованих у вихідному вікні топки	$\Psi_{ок}$	-	0.3668	0.3668	0.3668	0.3668
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986
Ступінь чорноти топки	a_r	-	0.576	0.594	0.611	0.627
Температура газів на виході з топки	θ''_T	°C	1157	1129	1099	1067
Ентальпія газів на виході з топки	I''_T	ккал/м ³	4419.08	4022.02	3669.86	3356.93
Кількість теплоти, сприйнятої в топці	$Q''_л$	ккал/м ³	5166.79	5468.95	5740.22	5983.38

Продовження таблиці А.2 «Топка при різних концентраціях кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Середнє теплове навантаження променесприймаючої поверхні нагріву	q _л	ккал/(м ² *ГОД)	142829.80	150617.88	157587.45	163815.28
Теплонапруга топкового об'єму (до ширм)	q _v	ккал/(м ³ *ГОД)	144127.78	143589.52	143134.16	142743.92

Таблиця А.3 «I зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Відносна висота зони	h/H_T	-	0.264	0.264	0.264	0.264
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{I^{CF}}$	-	0.96	0.96	0.96	0.96
Тепло, що вноситься в топку повітрям	Q_B	ккал/кг	1170.845	0.96	0.96	928.601
Температура газів на виході із зони	g''	°C	1595	1077.177	997.386	1660
Ентальпія	I''	ккал/м ³	6335.89	1620	1640	5522.02
Теплоємність продуктів згорання	$V_{c''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.97	6031.76	5756.59	3.33
Добуток	$p_{пS}$	(м*кгс)/см ²	1.775	3.72	3.51	2.161
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_T	1/(м*кгс/см ²)	0.674	1.906	2.035	0.598
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.196	0.644	0.620	1.292
Співвідношення складу вулецю і водню в робочій масі палива	C_p/H_p	-	2.968	2.968	2.968	2.968
Коефіцієнт ослаблення променів сажистими частинками	k_c	1/(м*кгс/см ²)	1.570	1.570	1.570	1.570
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.658	0.664	0.670	0.675
Середній коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ_{cp}	-	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986

Продовження таблиці А.3 «I зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	Ψ'	-	0.1	0.1	0.1	0.1
Добуток коефіцієнта теплової ефективності на сумарну поверхню, що обмежує зону	ΨF	-	206.6780	206.6780	206.6780	206.6780
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.763	0.768	0.772	0.776
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1590	1619	1646	1665
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{пл}$	ккал/(м ² *год)	269516.82	288395.68	307523.06	321478.74

Таблиця А.4 «Ступінь чорноти топки останньої зони при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Температура димових газів на виході з останньої зони	ϑ''	°C	1150	1150	1150	1150
Добуток	$p_{пs}$	(м*кгс)/см ²	1.775	1.906	2.035	2.161
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	1.033	1.018	1.005	0.994
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.833	1.940	2.045	2.149
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	0.840	0.856	0.871	0.883
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширми	$\Psi_{ш}$	-	0.3575	0.3575	0.3575	0.3575
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	0.5158	0.5158	0.5158	0.5158
Ступінь чорноти топки	$a_{т}$	-	0.911	0.920	0.929	0.936

Таблиця А.5 «II зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Відносна висота зони	h_{II}/H_T	-	0.114	0.114	0.114	0.114
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{II}^{сг}$	-	0.955	0.955	0.955	0.955
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1590	1619	1646	1665
Ентальпія	I'	ккал/м ³	6312.86	6026.84	5782.21	5542.08
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1395	1400	1400	1395
Ентальпія	I''	ккал/м ³	5452.95	5120.20	4817.97	4539.03
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.909	3.657	3.441	3.254
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.016	1.018	1.020	1.022
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1492	1509	1523	1530
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.715	0.715	0.715	0.715
Добуток	$p_{пs}$	(м*кгс)/см ²	1.775	1.906	2.035	2.161
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	1/(м*кгс/см ²)	0.835	0.819	0.809	0.804
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.482	1.561	1.645	1.737
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	0.773	0.790	0.807	0.824

Продовження таблиці А.5 «II зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Ступінь чорноти топки	a_t	-	0.826	0.840	0.854	0.868
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	0	0	0	0
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1395	1398	1399	1395
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лп}$	ккал/(м ² *Год)	281360.31	296526.81	311204.74	321314.89

Таблиця А.6 «III зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Відносна висота зони	h_{III}/H_T	-	0.114	0.114	0.114	0.114
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{III}^{сг}$	-	0.96	0.96	0.96	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1395	1398	1399	1395
Ентальпія	I'	ккал/м ³	5454.81	5112.53	4814.98	4539.00
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1320	1320	1315	1305
Ентальпія	I''	ккал/м ³	5122.47	4790.17	4487.67	4207.88
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.881	3.629	3.413	3.224
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.007	1.008	1.008	1.009
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1358	1359	1357	1350
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.715	0.715	0.715	0.715
Добуток	$p_{пs}$	(м*кгс)/см ²	1.775	1.906	2.035	2.161
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	1/(м*кгс/см ²)	0.896	0.882	0.875	0.874
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.590	1.682	1.781	1.888
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	0.796	0.814	0.832	0.849

Продовження таблиці А.6 «ІІІ зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.845	0.860	0.873	0.887
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1323	1318	1313	1303
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лш}$	ккал/(м ² *год)	210115.67	213178.79	215471.59	215206.79

Таблиця А.7 «IV зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Ступінь вигорання палива на виході із зони	β_{IV}^{CF}	-	0.96	0.96	0.96	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1323	1318	1313	1303
Ентальпія	I'	ккал/м ³	5135.04	4782.51	4478.63	4202.30
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1265	1255	1245	1235
Ентальпія	I''	ккал/м ³	4882.94	4525.33	4219.36	3954.35
Теплоємність продуктів згорання	$V_{c''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.860	3.606	3.389	3.202
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.005	1.006	1.007	1.007
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1294	1287	1279	1269
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{\text{екр}}$	-	0.65	0.65	0.65	0.65
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{\text{ш}}$	-	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	0.5666	0.5666	0.5666	0.5666
Добуток	$p_{\text{пс}}$	(м*кгс)/см ²	1.775	1.906	2.035	2.161
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_{Γ}	1/(м*кгс/см ²)	0.940	0.934	0.930	0.928

Продовження таблиці А.7 «IV зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.668	1.780	1.893	2.006
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.811	0.831	0.849	0.865
Ступінь чорноти топки	a_t	-	0.884	0.897	0.909	0.919
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1264	1256	1247	1235
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лIV}$	ккал/(м ² *год)	169515.92	169294.96	168349.33	165521.68
Середнє теплове навантаження	$q_{л,шIV}$	ккал/(м ² *год)	96624.08	96498.13	95959.12	94347.36

Таблиця А.8 «V зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{\text{екр}}$	-	0.585	0.585	0.585	0.585
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{\text{ш}}$	-	0.3335	0.3335	0.3335	0.3335
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	0.4727	0.4727	0.4727	0.4727
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{\text{в}}^{\text{сг}}$	-	0.96	0.96	0.96	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1264	1256	1247	1235
Ентальпія	I'	ккал/м ³	4879.96	4530.69	4228.24	3953.02
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1140	1125	1110	1095
Ентальпія	I''	ккал/м ³	4348.78	4006.24	3712.48	3457.57
Теплоємність продуктів згорання	$V_{\text{с}}''$	ккал/(м ³ *°C)	3.815	3.561	3.345	3.158
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.012	1.013	1.013	1.014
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1202	1191	1179	1165
Ступінь чорноти топки	$a_{\text{т}}$	-	0.911	0.920	0.929	0.936
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	0	0	0	0

Продовження таблиці А.8 «V зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %			
			23	25	27	29
Температура газів на виході з зони	θ''	°С	1140	1125	1111	1094
Ентальпія	Г''	ккал/м ³	4349.69	4007.76	3714.95	3453.88
Середня температура газів в зоні	θ	°С	1202	1191	1179	1164
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	q _{лV}	ккал/(м ² *год)	123638.92	121135.33	118338.27	114528.11
Середнє теплове навантаження	q _{л.шV}	ккал/(м ² *год)	70474.19	69047.14	67452.81	65281.02

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 «Ентальпії продуктів згорання при двоступеневій схемі за концентрації кисню 21%»

Температура, °C	Г ^о _п , МДж/м ³	Г ^о _г , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.249	1.461	1.336	1.362	1.336	1.362
200	2.513	2.949	2.698	1.395	2.698	1.395
300	3.802	4.474	4.094	1.438	4.094	
400	5.114	6.043	5.532	1.475		
500	6.457	7.653	7.007	1.501		
600	7.832	9.291	8.508	1.545		
700	9.247	10.978	10.053	1.597		
800	10.670	12.717	11.650	1.633		
900	12.093	14.492	13.283	1.660		
1000	13.555	16.298	14.943	1.660		
1100	15.056	18.109	16.603	1.673		
1200	16.558	19.932	18.276	1.722		
1300	18.060	21.805	19.999	1.754		
1400	19.601	23.713	21.753	1.741		
1500	21.142	25.607	23.493	1.772		
1600	22.683	27.533	25.265	1.785		
1700	24.225	29.472	27.050	1.794		
1800	25.766	31.421	28.844	1.821		
1900	27.346	33.400	30.665	1.812		
2000	28.927	35.370	32.477	1.834		
2100	30.508	37.363	34.312	1.843		
2200	32.089	39.364	36.155			

Таблиця Б.2 «Ентальпії продуктів згоряння при двоступеневій схемі за концентрації кисню 23%»

Температура, °C	Γ_n , МДж/м ³	Γ_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.140	1.353	1.239	1.264	1.239	1.264
200	2.295	2.732	2.503	1.296	2.503	1.296
300	3.471	4.146	3.799	1.337	3.799	
400	4.669	5.603	5.136	1.372		
500	5.896	7.097	6.508	1.396		
600	7.151	8.619	7.904	1.438		
700	8.443	10.186	9.342	1.487		
800	9.742	11.803	10.828	1.519		
900	11.041	13.451	12.347	1.546		
1000	12.376	15.131	13.894	1.547		
1100	13.747	16.815	15.440	1.560		
1200	15.118	18.512	17.000	1.606		
1300	16.489	20.255	18.606	1.634		
1400	17.897	22.029	20.240	1.624		
1500	19.304	23.794	21.864	1.652		
1600	20.711	25.586	23.515	1.665		
1700	22.118	27.392	25.180	1.674		
1800	23.525	29.207	26.854	1.698		
1900	24.969	31.049	28.552	1.692		
2000	26.412	32.885	30.244	1.711		
2100	27.855	34.741	31.955	1.720		
2200	29.298	36.605	33.675			

Таблиця Б.3 «Ентальпії продуктів згоряння при двоступеневій схемі за концентрації кисню 25%»

Температура, °C	Γ°_n , МДж/м ³	Γ°_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	1.049	1.262	1.157	1.182	1.157	1.182
200	2.111	2.549	2.338	1.213	2.338	1.213
300	3.193	3.871	3.551	1.252	3.551	
400	4.295	5.233	4.803	1.285		
500	5.424	6.631	6.088	1.308		
600	6.579	8.054	7.396	1.348		
700	7.768	9.521	8.744	1.394		
800	8.963	11.034	10.138	1.423		
900	10.158	12.577	11.562	1.451		
1000	11.386	14.151	13.012	1.452		
1100	12.647	15.729	14.464	1.465		
1200	13.909	17.319	15.928	1.507		
1300	15.170	18.953	17.436	1.533		
1400	16.465	20.615	18.969	1.526		
1500	17.759	22.271	20.495	1.551		
1600	19.054	23.951	22.046	1.564		
1700	20.349	25.644	23.610	1.573		
1800	21.643	27.347	25.182	1.594		
1900	22.971	29.074	26.777	1.591		
2000	24.299	30.798	28.368	1.607		
2100	25.627	32.538	29.976	1.616		
2200	26.954	34.287	31.592			

Таблиця Б.4 «Ентальпії продуктів згоряння при двоступеневій схемі за концентрації кисню 27%»

Температура, °C	Γ°_n , МДж/м ³	Γ°_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	0.971	1.184	1.087	1.112	1.087	1.112
200	1.955	2.394	2.198	1.142	2.198	1.142
300	2.957	3.636	3.341	1.179	3.341	
400	3.977	4.917	4.520	1.211		
500	5.022	6.233	5.731	1.233		
600	6.092	7.573	6.964	1.271		
700	7.192	8.954	8.235	1.315		
800	8.299	10.380	9.550	1.342		
900	9.405	11.833	10.892	1.369		
1000	10.543	13.316	12.261	1.371		
1100	11.711	14.803	13.632	1.384		
1200	12.878	16.303	15.016	1.424		
1300	14.046	17.844	16.439	1.447		
1400	15.245	19.411	17.886	1.442		
1500	16.444	20.973	19.329	1.465		
1600	17.643	22.558	20.794	1.478		
1700	18.841	24.156	22.272	1.487		
1800	20.040	25.762	23.758	1.506		
1900	21.269	27.392	25.265	1.506		
2000	22.499	29.020	26.770	1.519		
2100	23.728	30.662	28.289	1.528		
2200	24.958	32.313	29.817			

Таблиця Б.5 «Ентальпії продуктів згоряння при двоступеневій схемі за концентрації кисню 29%»

Температура, °C	Γ_n , МДж/м ³	Γ_r , МДж/м ³	I, МДж/м ³			
			ГАЗОХІД			
			Топка		Відхідні гази	
			I	ΔI	I	ΔI
100	0.904	1.117	1.027	1.051	1.027	1.051
200	1.820	2.260	2.078	1.081	2.078	1.081
300	2.753	3.434	3.159	1.117	3.159	
400	3.703	4.646	4.275	1.147		
500	4.676	5.890	5.423	1.168		
600	5.672	7.158	6.591	1.206		
700	6.696	8.466	7.796	1.247		
800	7.726	9.816	9.043	1.272		
900	8.757	11.191	10.315	1.299		
1000	9.815	12.596	11.614	1.301		
1100	10.903	14.005	12.915	1.314		
1200	11.990	15.428	14.228	1.352		
1300	13.078	16.888	15.580	1.373		
1400	14.194	18.373	16.953	1.370		
1500	15.310	19.855	18.324	1.391		
1600	16.426	21.357	19.715	1.404		
1700	17.542	22.873	21.118	1.413		
1800	18.658	24.397	22.531	1.430		
1900	19.803	25.941	23.961	1.432		
2000	20.947	27.487	25.393	1.443		
2100	22.092	29.045	26.836	1.452		
2200	23.237	30.611	28.287			

Таблиця Б.6 «Тепловий баланс при двоступеневій схемі спалювання палива»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Теплотворна здатність палива	Q_p^p	ккал/м ³	8480	8480	8480	8480	8480
Температура димових газів	ϑ_{yx}	°C	160	160	160	160	160
Ентальпія димових газів	I_{yx}	ккал/м ³	514.31	476.96	445.58	418.85	395.81
Температура холодного повітря	$t_{x.v.}$	°C	30	30	30	30	30
Ентальпія холодного повітря	$I_{x.v.}$	ккал/м ³	100.20	92.49	86.02	80.50	75.74
Втрати теплоти від хімічного недопалу	q_3	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Втрати теплоти з димовими газами	q_2	%	5.001	4.643	4.342	4.085	3.864
Втрати теплоти в навколишнє середовище	q_5	%	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Сума втрат теплоти	Σq_i	%	5.911	5.553	5.252	4.995	4.774
ККД	η	%	94.089	94.447	94.748	95.005	95.226
Тиск перегрітої пари	$p_{пп}$	кгс/см ²	140	140	140	140	140
Температура перегрітої пари	$t_{пп}$	°C	560	560	560	560	560
Ентальпія перегрітої пари	$i_{пп}$	ккал/кг	833.2	833.2	833.2	833.2	833.2

Продовження таблиці Б.6 «Тепловий баланс при двоступеневій схемі спалювання палива»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Температура живильної води	$t_{пв}$	°C	230	230	230	230	230
Ентальпія живильної води	$i_{пв}$	ккал/кг	238.2	238.2	238.2	238.2	238.2
Паропродуктивність котла	$D_{розр}$	кг/год	420000	420000	420000	420000	420000
Тепло, що корисно використовується в котлоагрегаті	$Q_{ка}$	ккал/год	249900000	249900000	249900000	249900000	249900000
Повна витрата палива	B_p	м ³ /год	31321	31202	31103	31019	30947
Коефіцієнт збереження теплоти	φ	-	0.9957	0.9957	0.9957	0.9957	0.9957

Таблиця Б.7 «Топка при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Коефіцієнт надлишку повітря в топці	α_T	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Температура гарячого повітря	$t_{г.в.}$	°C	400	400	400	400	400
Ентальпія гарячого повітря	$\Gamma_{г.в.}^0$	ккал/кг	1221.29	1115.09	1025.88	949.89	884.38
Тепло, що вноситься повітрям в топку	Q_B	ккал/кг	1099.161	1003.581	923.295	854.903	795.944
Корисне тепловиділення в топці	Q_T	ккал/кг	9536.761	9441.181	9360.895	9292.503	9233.544
Теоретична температура горіння	ϑ_a	°C	2406	2543	2674	2799	2920
Відносне розташування максимуму температур по висоті топки	x_T	-	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159
Параметр	M	-	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Температура газів на виході з топки	ϑ''_T	°C	1200	1200	1200	1200	1200
Ентальпія газів на виході з топки	Γ''_T	ккал/м ³	4364.89	4060.17	3804.20	3586.16	3398.19
Середня сумарна теплоємність продуктів згоряння	$V_{ср}$	ккал/(м ³ *°C)	4.287	4.007	3.771	3.569	3.394

Продовження таблиці Б.7 «Топка при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Добуток	$p_{пS}$	$(м*кгс)/см^2$	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	$1/(м*кгс/см^2)$	0.332	0.326	0.322	0.318	0.315
Оптична товщина	k_{ps}	-	0.624	0.663	0.702	0.740	0.778
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	0.464	0.485	0.504	0.523	0.540
Коефіцієнт теплової ефективності екранів	$\Psi_{экр}$	-	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
Коефіцієнт, що враховує забруднення ширм, що розташовані у вихідному вікні топки	$\zeta_{ок}$	-	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705
Коефіцієнт теплової ефективності ширм, розташованих у вихідному вікні топки	$\Psi_{ок}$	-	0.3668	0.3668	0.3668	0.3668	0.3668
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.592	0.611	0.630	0.647	0.663
Температура газів на виході з топки	ϑ''_T	$^{\circ}C$	1135	1100	1063	1024	986
Ентальпія газів на виході з топки	Γ''_T	$ккал/м^3$	4105.58	3687.69	3323.74	3005.90	2727.52
Кількість теплоти, сприйнятої в топці	$Q_{л}^T$	$ккал/м^3$	5407.614	5728.621	6011.139	6259.584	6478.128

Продовження таблиці Б.7 «Топка при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Середнє теплове навантаження променесприймаючої поверхні нагріву	$q_{\text{л}}$	ккал/(м ² *год)	149086.47	157336.82	164571.25	170910.18	176466.32
Теплонапруга топкового об'єму (до ширм)	q_{v}	ккал/(м ³ *год)	143741.62	143195.78	142740.47	142354.89	142024.17

Таблиця Б.8 «I зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Відносна висота зони	h_i/H_T	-	0.264	0.264	0.264	0.264	0.264
Ступінь вигорання палива на виході із зони	β_{I}^{er}	-	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Тепло, що вноситься в топку повітрям	Q_v	ккал/кг	1099.161	1003.581	923.295	854.903	795.944
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1615	1640	1665	1685	1700
Ентальпія	I''	ккал/м ³	6097.98	5775.23	5507.96	5266.21	5043.69
Теплоємність продуктів згорання	V_c''	ккал/(м ³ *°C)	3.776	3.521	3.308	3.125	2.967
Добуток	p_{ns}	(м*кгс)/см ²	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	1/(м*кгс/см ²)	0.650	0.621	0.594	0.572	0.556
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.224	1.262	1.294	1.330	1.371
Співвідношення складу вулецю і водню в робочій масі палива	C_p/H_p	-	2.968	2.968	2.968	2.968	2.968
Коефіцієнт ослаблення променів сажистими частинками	k_c	1/(м*кгс/см ²)	1.818	1.818	1.818	1.818	1.818
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.664	0.670	0.676	0.681	0.688
Середній коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ_{cp}	-	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986	0.5986

Продовження таблиці Б.8 «I зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	Ψ'	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Добуток коефіцієнта теплової ефективності на сумарну поверхню, що обмежує зону	ΨF	-	206.6780	206.6780	206.6780	206.6780	206.6780
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.767	0.772	0.777	0.781	0.786
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1612	1643	1662	1679	1698
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{\text{пл}}$	ккал/(м ² *год)	284331.57	305500.52	319073.24	332508.00	348053.97

Таблиця Б.9 «Ступінь чорноти топки останньої зони при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Температура димових газів на виході з останньої зони	ϑ''	°C	1150	1150	1150	1150	1150
Добуток	$\rho_{пS}$	(м*кгс)/см ²	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	1.021	1.006	0.994	0.983	0.975
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.922	2.045	2.166	2.286	2.404
Ступінь чорноти факела	$a_{ф}$	-	0.854	0.871	0.885	0.898	0.910
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширми	$\Psi_{ш}$	-	0.3575	0.3575	0.3575	0.3575	0.3575
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	0.5158	0.5158	0.5158	0.5158	0.5158
Ступінь чорноти топки	$a_{г}$	-	0.919	0.929	0.937	0.945	0.951

Таблиця Б.10 «II зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Відносна висота зони	h_{II}/H_T	-	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{II}^{сг}$	-	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1612	1643	1662	1678.74	1698
Ентальпія	I'	ккал/м ³	6086.97	5788.31	5495.05	5244.10	5037.12
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1400	1400	1390	1385	1375
Ентальпія	I''	ккал/м ³	5195.15	4833.85	4493.74	4219.97	3966.95
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.711	3.453	3.233	3.047	2.885
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.018	1.020	1.023	1.026	1.028
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1506	1522	1526	1531.87	1537
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715
Добуток	$p_{пс}$	(м*кгс)/см ²	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_r	1/(м*кгс/см ²)	0.822	0.810	0.807	0.803	0.803
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.547	1.646	1.760	1.866	1.981
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.787	0.807	0.828	0.845	0.862

Продовження таблиці Б.10 «II зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.838	0.854	0.871	0.884	0.897
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi'' - \Psi'$	-	0	0	0	0	0
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1397	1398	1392	1383	1376
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{\text{лп}}$	ккал/(м ² *год)	293267.33	309702.58	320151.76	328185.26	337624.13

Таблиця Б.11 «III зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Відносна висота зони	h_{III}/H_T	-	0.114	0.114	0.114	1383	0.114
Ступінь вигорання палива на виході із зони	β_{III}^{cr}	-	0.96	0.96	0.96	4214.63	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1397	1398	1392	1290	1376
Ентальпія	I'	ккал/м ³	5183.55	4826.16	4502.19	3892.17	3971.75
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1320	1315	1300	3.017	1275
Ентальпія	I''	ккал/м ³	4860.04	4502.15	4164.20	1.010	3640.28
Теплоємність продуктів згорання	Vc''	ккал/(м ³ *°C)	3.682	3.424	3.203	1337	2.855
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.008	1.008	1.009	1383	1.010
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1359	1357	1346	4214.63	1326
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	Ψ	-	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715
Добуток	$p_{II}S$	(м*кгс)/см ²	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	k_T	1/(м*кгс/см ²)	0.886	0.876	0.877	0.876	0.880
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.667	1.781	1.912	2.036	2.169
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.811	0.832	0.852	0.869	0.886

Продовження таблиці Б.11 «III зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.857	0.874	0.890	0.903	0.916
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\psi'' - \psi'$	-	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1319	1312	1301	1287	1276
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лIII}$	ккал/(м ² *год)	212636.31	215009.64	214513.59	211681.44	209834.60

Таблиця Б.12 «IV зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{IV}^{сг}$	-	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1319	1312	1301	1287	1276
Ентальпія	Γ'	ккал/м ³	4856.26	4490.80	4167.94	3882.56	3643.81
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1260	1245	1230	1215	1200
Ентальпія	Γ''	ккал/м ³	4611.72	4232.72	3912.20	3637.16	3398.19
Теплоємність продуктів згорання	$V_{с''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.660	3.400	3.181	2.994	2.832
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.006	1.007	1.007	1.008	1.008
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1290	1279	1266	1251	1238
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{экр}$	-	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{ш}$	-	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705	0.3705
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{ср}$	-	0.5666	0.5666	0.5666	0.5666	0.5666
Добуток	$p_{пs}$	(м*кгс)/см ²	1.882	2.033	2.180	2.324	2.466
Коефіцієнт ослаблення променів триатомними газами	$k_{г}$	1/(м*кгс/см ²)	0.934	0.931	0.932	0.933	0.937

Продовження таблиці Б.12 «IV зона при різній концентрації кисню»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Оптична товщина	k_{ps}	-	1.757	1.893	2.031	2.170	2.310
Ступінь чорноти факела	a_{ϕ}	-	0.827	0.849	0.869	0.886	0.901
Ступінь чорноти топки	a_T	-	0.894	0.909	0.921	0.932	0.941
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\psi'' - \psi'$	-	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
Температура газів на виході з зони	ϑ''	°C	1257	1247	1232	1216	1203
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	$q_{лIV}$	ккал/(м ² *год)	169258.88	168189.21	164864.36	160439.23	156874.27
Середнє теплове навантаження	$q_{л.шIV}$	ккал/(м ² *год)	96477.56	95867.85	93972.69	91450.36	89418.33

Таблиця Б.13 «V зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Коефіцієнт теплової ефективності екранів зони	$\Psi_{\text{екр}}$	-	0.585	0.585	0.585	0.585	0.585
Коефіцієнт теплової ефективності вихідного вікна ширм	$\Psi_{\text{ш}}$	-	0.3335	0.3335	0.3335	0.3335	0.3335
Середній коефіцієнт теплової ефективності	$\Psi_{\text{ср}}$	-	0.4727	0.4727	0.4727	0.4727	0.4727
Ступінь вигорання палива на виході із зони	$\beta_{V^{\text{сг}}}$	-	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Температура газів на вході в зону	ϑ'	°C	1257	1247	1232	1216	1203
Ентальпія	I'	ккал/м ³	4601.40	4240.94	3920.38	3641.85	3407.36
Температура газів на виході із зони	ϑ''	°C	1130	1110	1090	1070	1055
Ентальпія	I''	ккал/м ³	4085.16	3724.88	3419.74	3157.53	2944.68
Теплоємність продуктів згорання	$V_{c''}$	ккал/(м ³ *°C)	3.615	3.356	3.137	2.951	2.791
Відношення теплоємностей	c'/c''	-	1.012	1.013	1.014	1.014	1.015
Середня температура газів в зоні	ϑ	°C	1194	1179	1161	1143	1129
Ступінь чорноти топки	$a_{\text{т}}$	-	0.919	0.929	0.937	0.945	0.951
Коефіцієнт, що характеризує віддачу тепла в вищерозташовану зону	$\Psi''' - \Psi'$	-	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.13 «V зона при двоступеневій схемі спалювання»

Величина, що розраховується	Позначення	Розмірність	Концентрація кисню, %				
			21	23	25	27	29
Температура газів на виході з зони	g''	°C	1128	1111	1092	1073	1055
Ентальпія	Г''	ккал/м ³	4076.61	3728.15	3425.18	3166.06	2944.57
Середня температура газів в зоні	g	°C	1193	1179	1162	1144	1129
Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні	q _{лV}	ккал/(м ² *Год)	121542.39	118346.34	113917.28	109341.74	105323.31
Середнє теплове навантаження	q _{л.шV}	ккал/(м ² *Год)	69279.16	67457.41	64932.85	62324.79	60034.29

Методи зниження шкідливих викидів

Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок визначає наміри України, як члена Енергетичного Співтовариства, суттєво скоротити викиди від існуючих великих спалювальних установок.

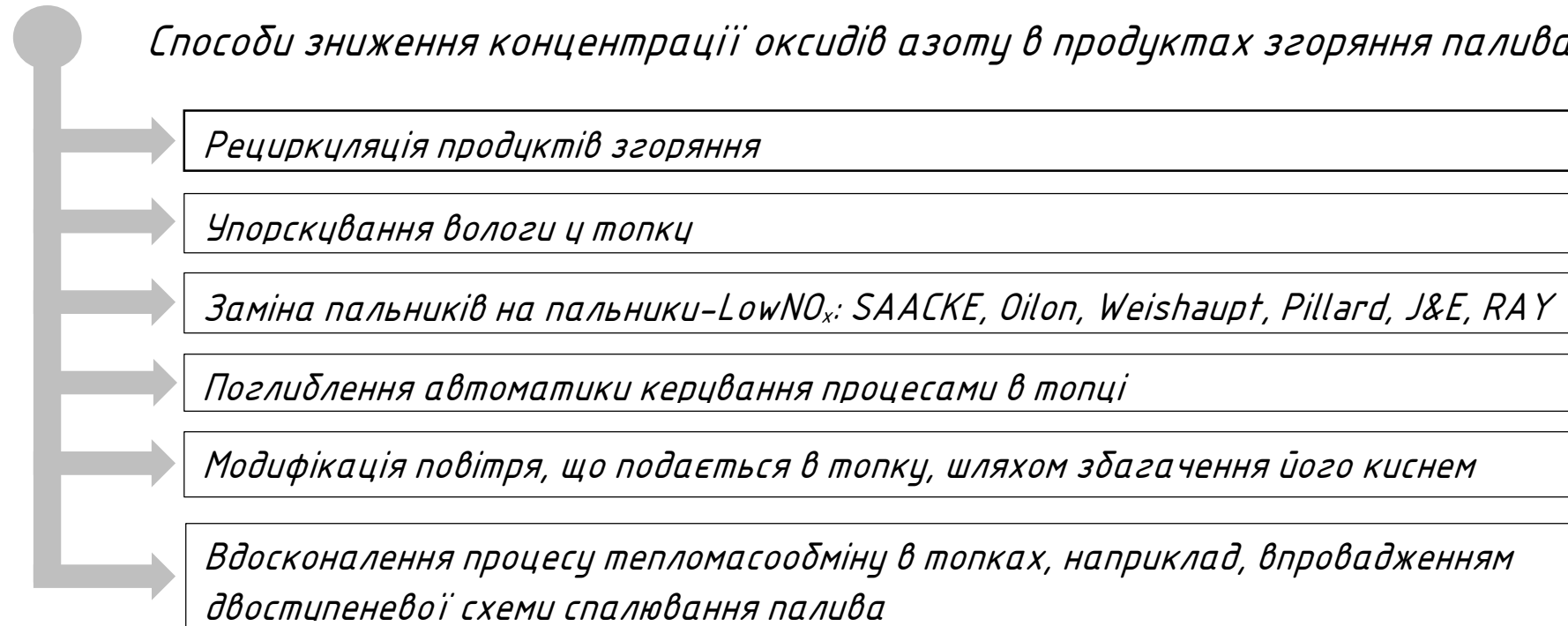
Україною, як членом Енергетичного Співтовариства, прийнято зобов'язання дотримуватися положень Договору про заснування Енергетичного Співтовариства та додатків до нього. Згідно з Додатком II до Договору всі великі спалювальні установки мають відповідати вимогам Директиви 2001/80/ЕС про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин у повітря від великих спалювальних установок.

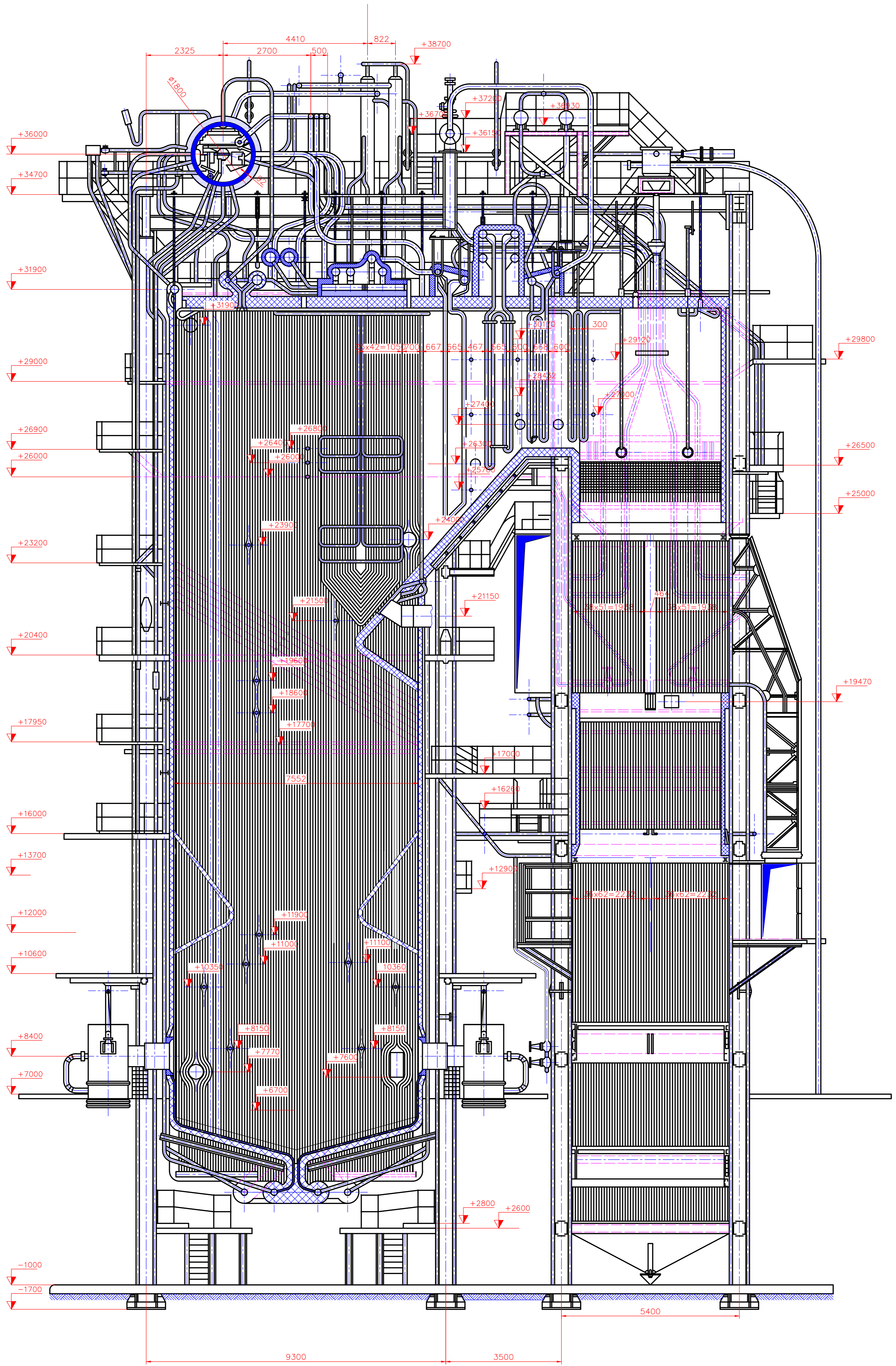
Викиди забруднюючих речовин, згідно Директиви Європейського парламенту, мають складати:

$$NO_x \leq 100 \text{ мг/нм}^3;$$

$$CO \leq 100 \text{ мг/нм}^3.$$

Способи зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згоряння палива:

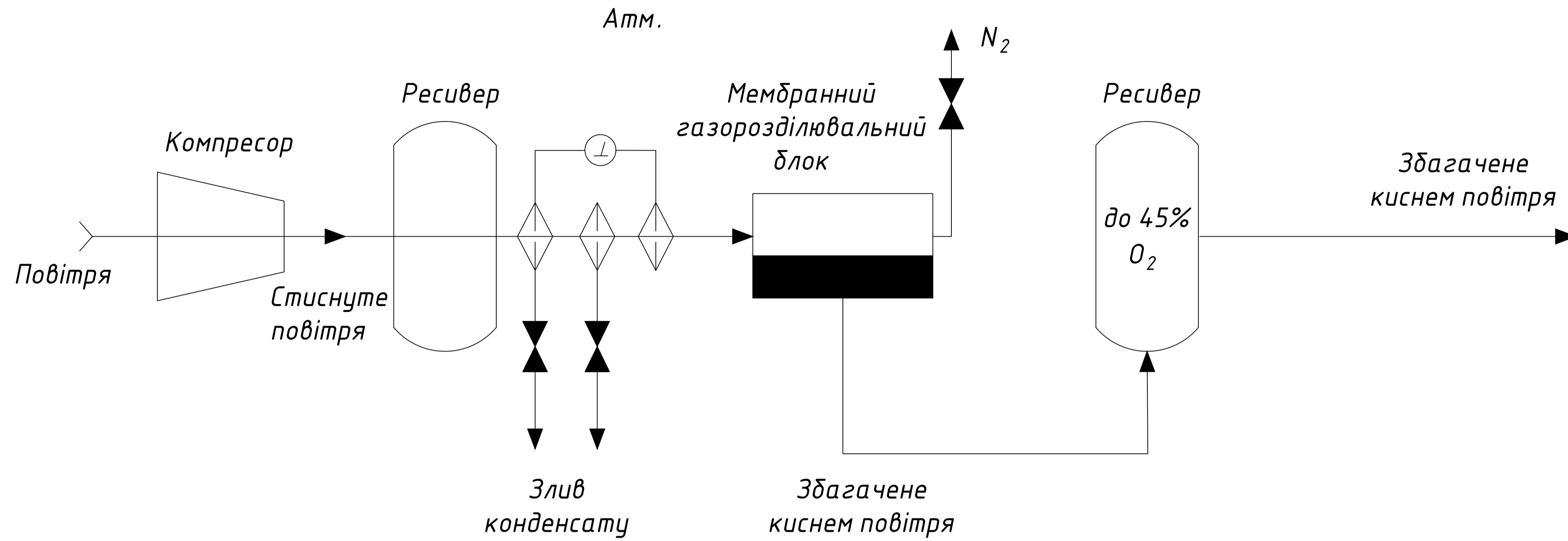




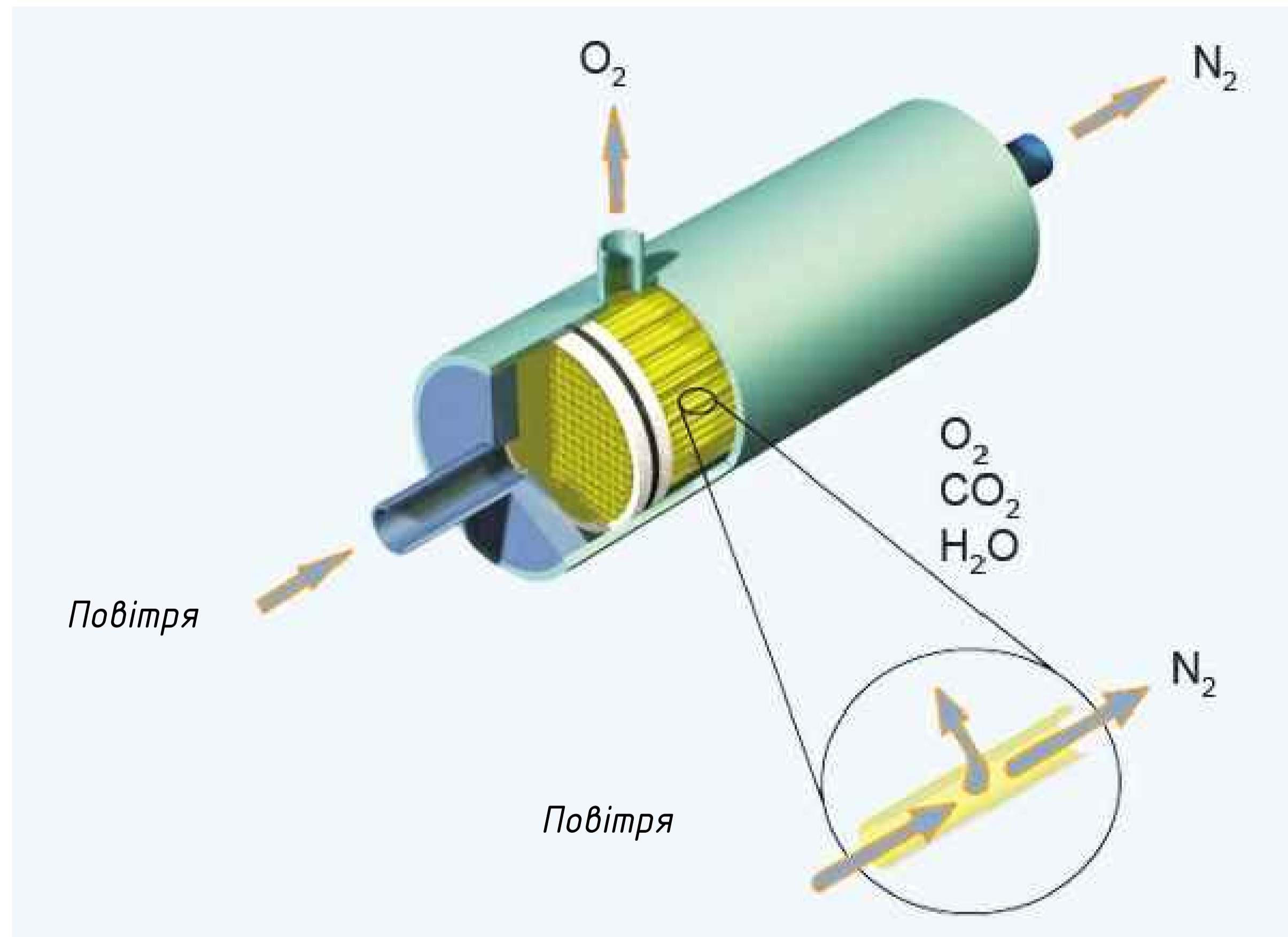
Атестаційна випускна робота магістра				Літера	Аркуш	Архів	
Зм.	Лист	№ док.	Підпис	Дата	MP	1	3
Розробила	Кишчан К.А.						
Керівник	Гладзін П.М.						
Заб. каф.	Кириченко М.А.						
Модернізація енергетичного парогенератора для роботи на збагаченому киснем дутьовому повітрі					Поздовжній розріз котельного агрегату ТП-87		
					ТЕМ-22		

Установка для мембранного разделения воздуха

Схема аппаратного оформления получения кислорода мембранным способом



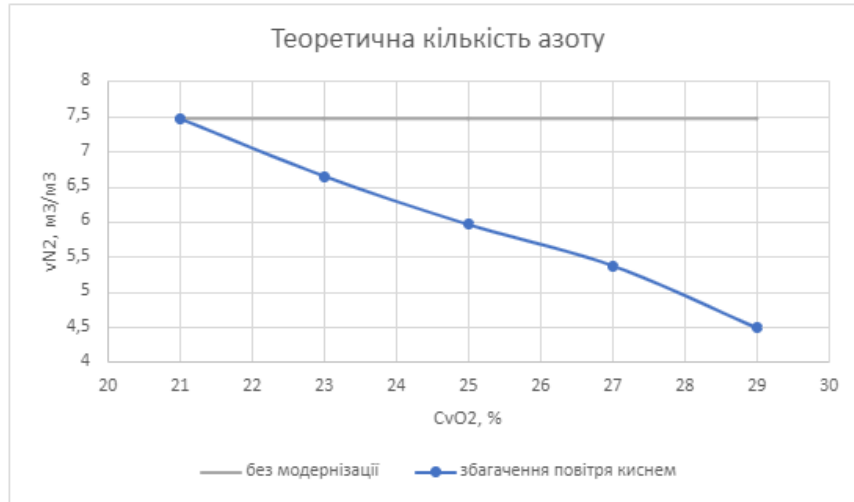
Газорозділювальний картридж



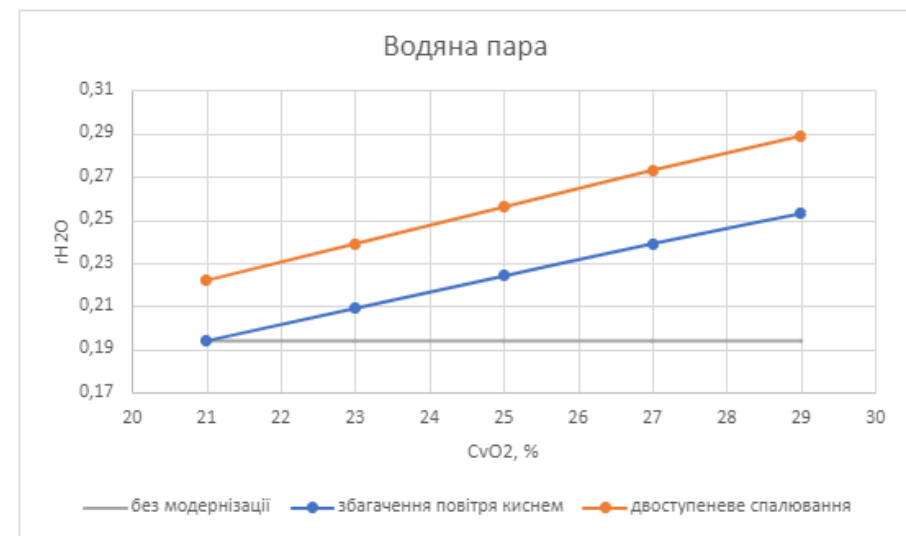
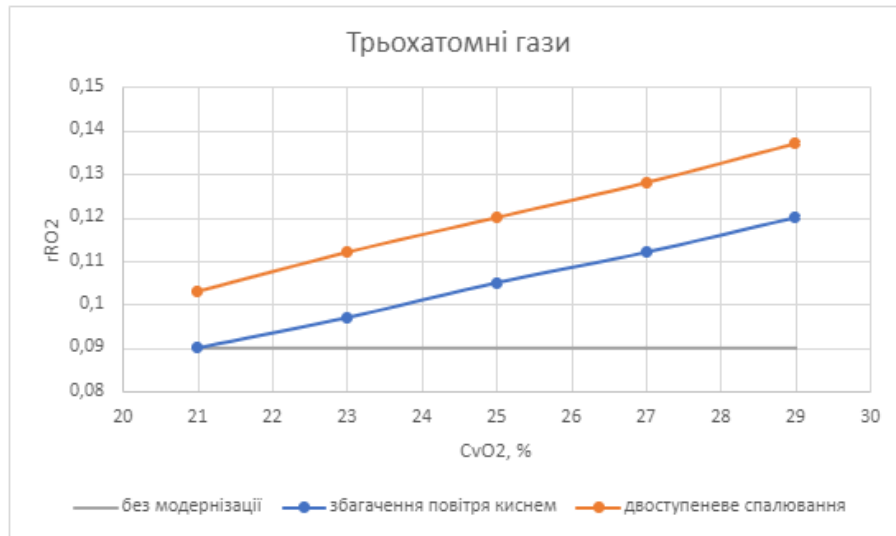
Вигляд устрановки в збірці



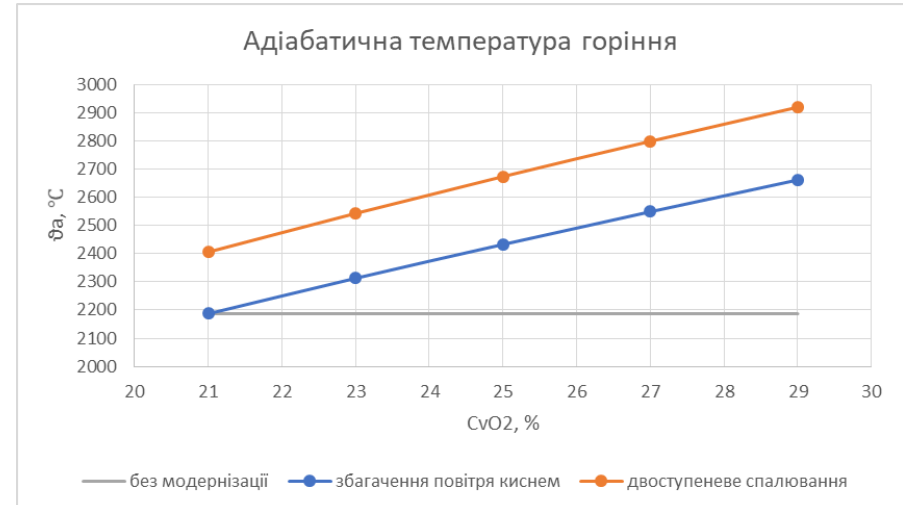
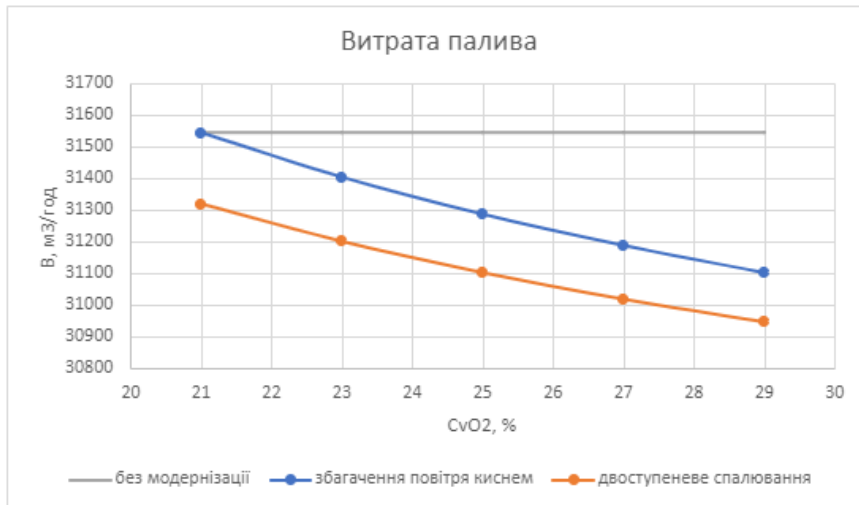
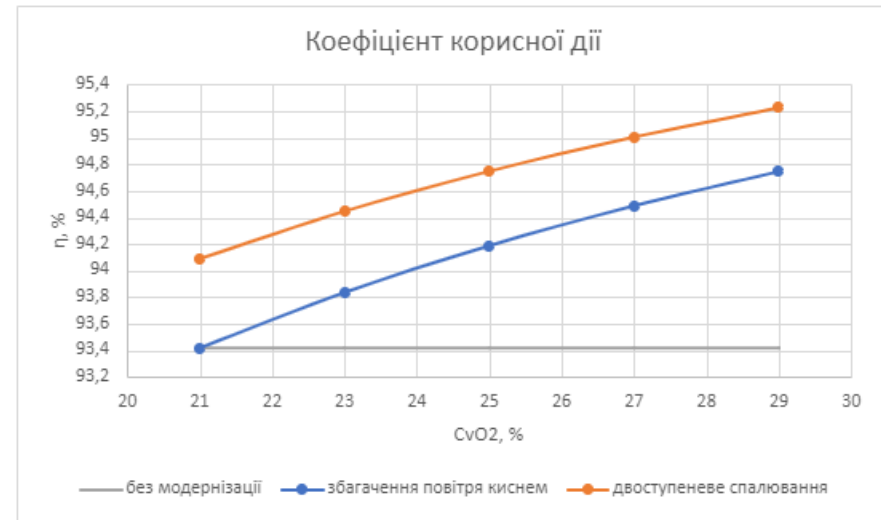
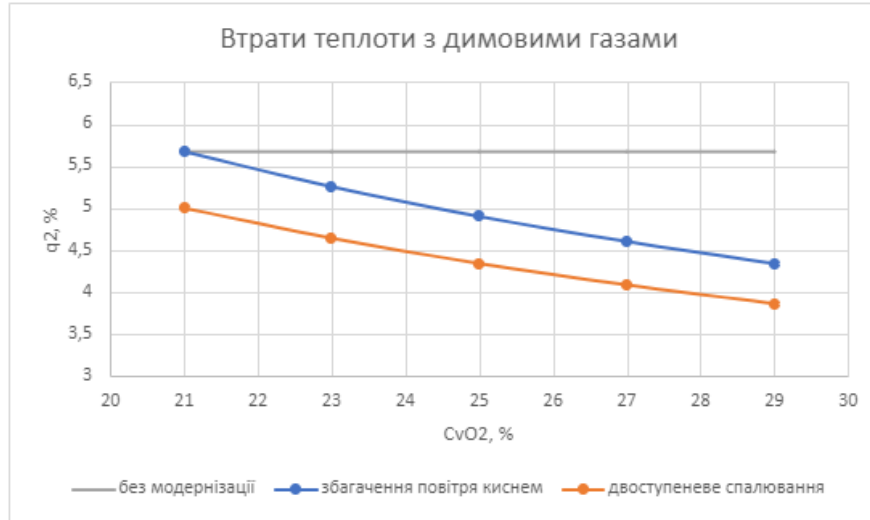
Результати розрахунків складу та об'єму продуктів згоряння



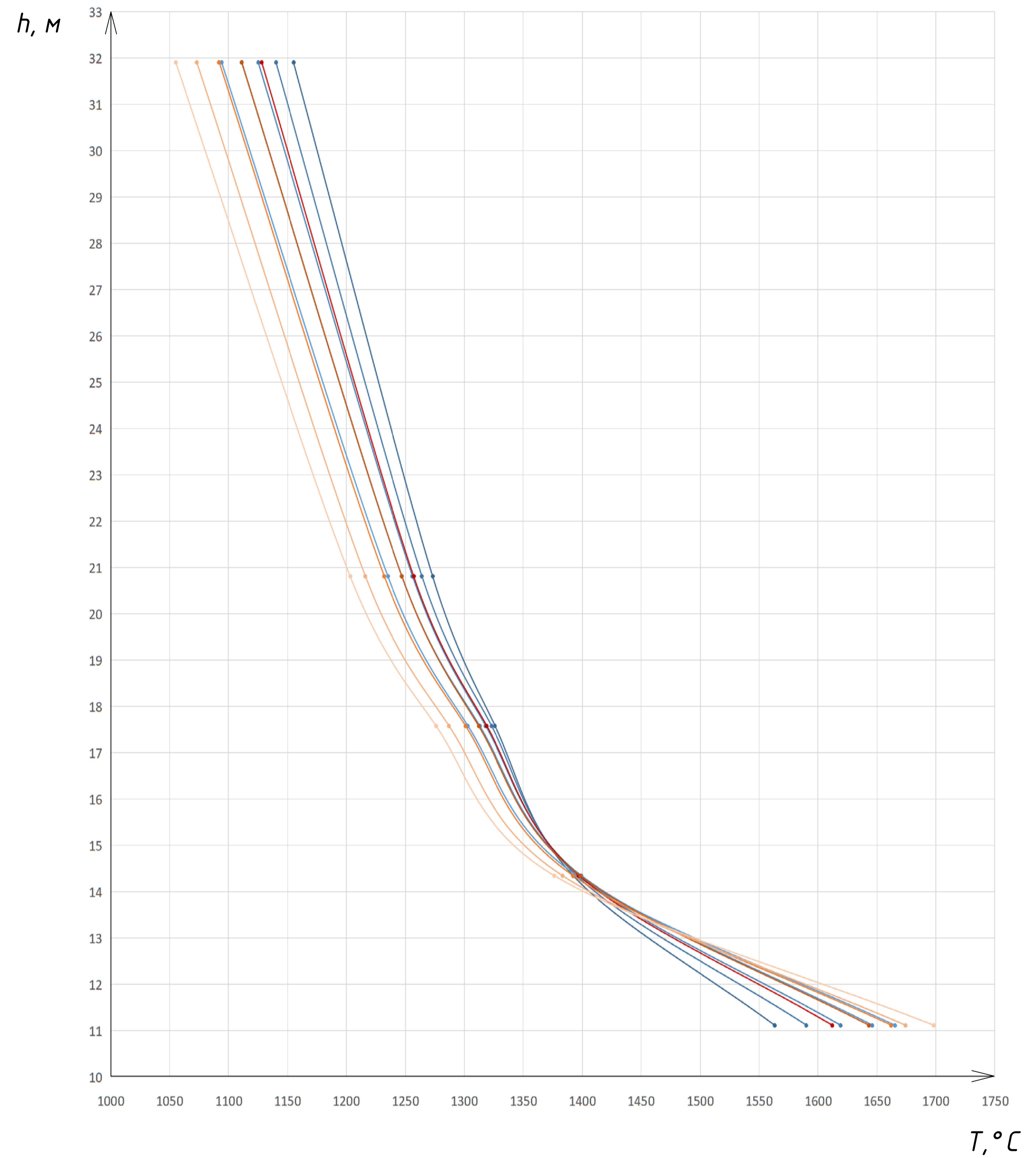
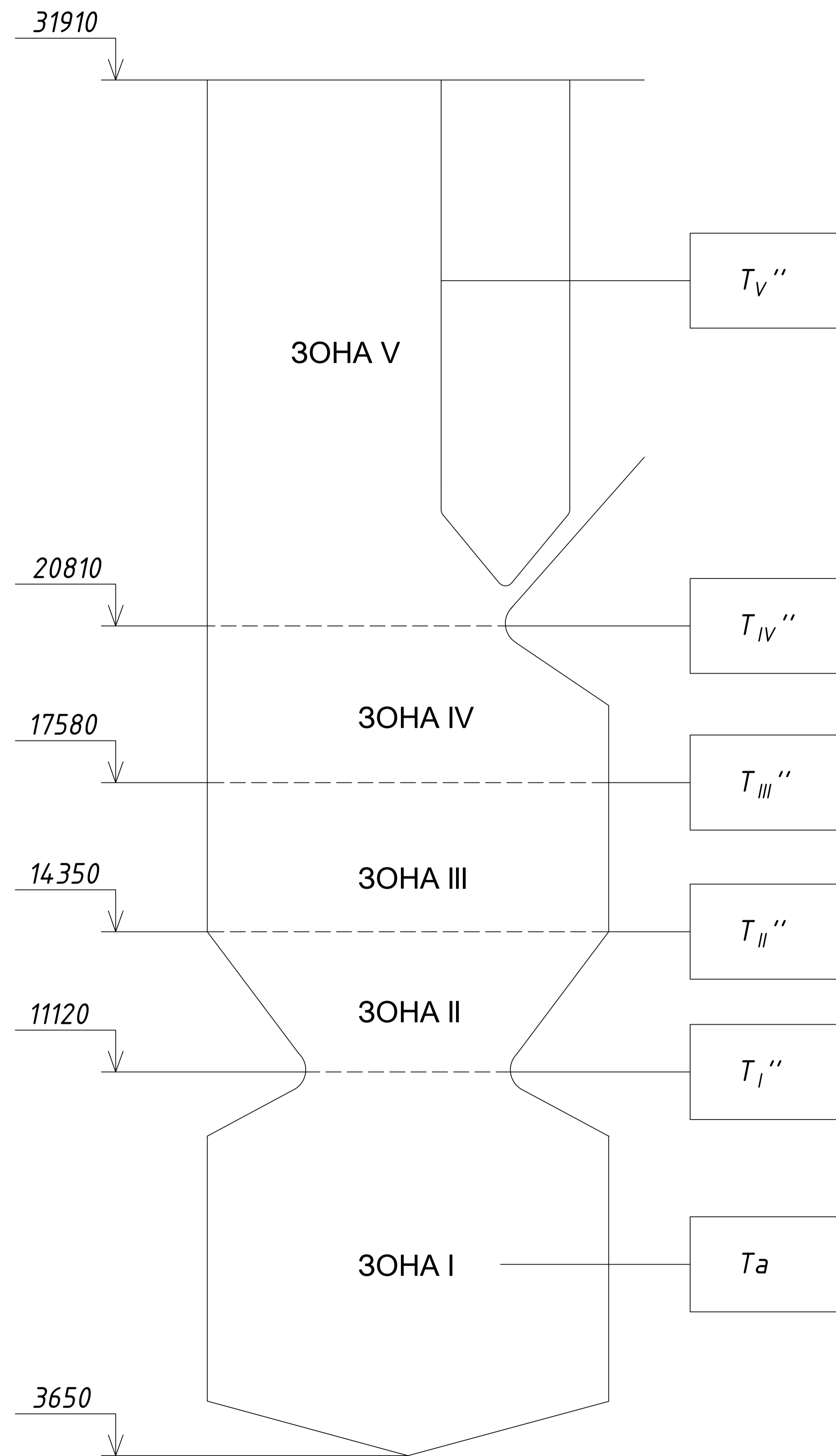
Величина, що розраховується	Розмірність	Концентрація кисню, %				
		21	23	25	27	29
Кількість теоретично необхідного повітря	m^3/m^3	9,438	8,617	7,928	7,341	6,835
Теоретична кількість азоту	m^3/m^3	7,466	6,645	5,956	5,369	4,862
Об'єм продуктів згоряння при $\alpha > 1$	m^3/m^3	11,076	10,201	9,466	8,840	8,301
Об'єм продуктів згоряння при $\alpha < 1$	m^3/m^3	9,661	8,909	8,277	7,739	7,275



Результати теплового розрахунку топки



Результати позонного розрахунку теплообміну в топці



- без модернізації
- концентрація кисню 23%
- концентрація кисню 25%
- концентрація кисню 27%
- концентрація кисню 29%
- недопал без збагачення киснем
- недопал з концентрацією кисню 23%
- недопал з концентрацією кисню 25%
- недопал з концентрацією кисню 27%
- недопал з концентрацією кисню 29%

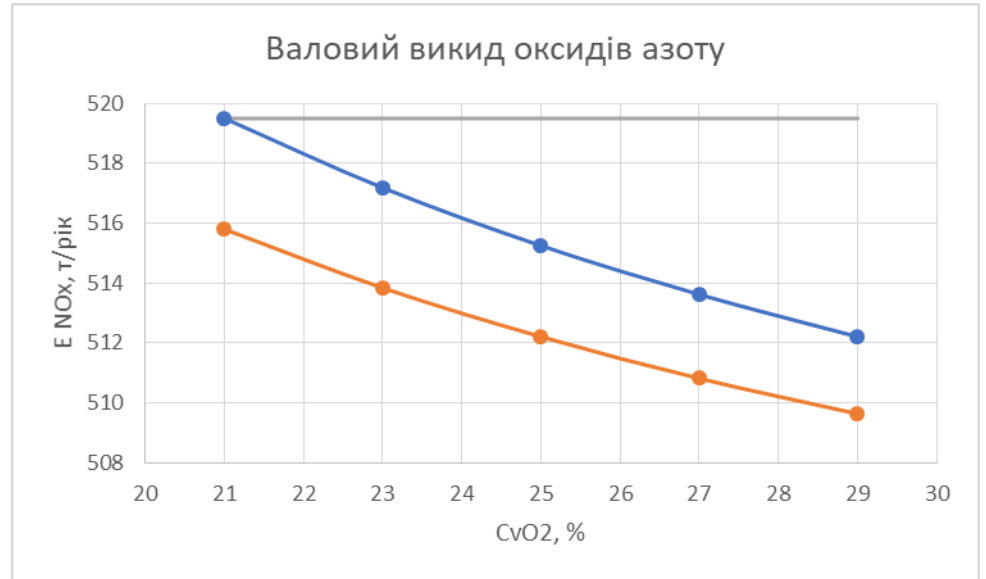
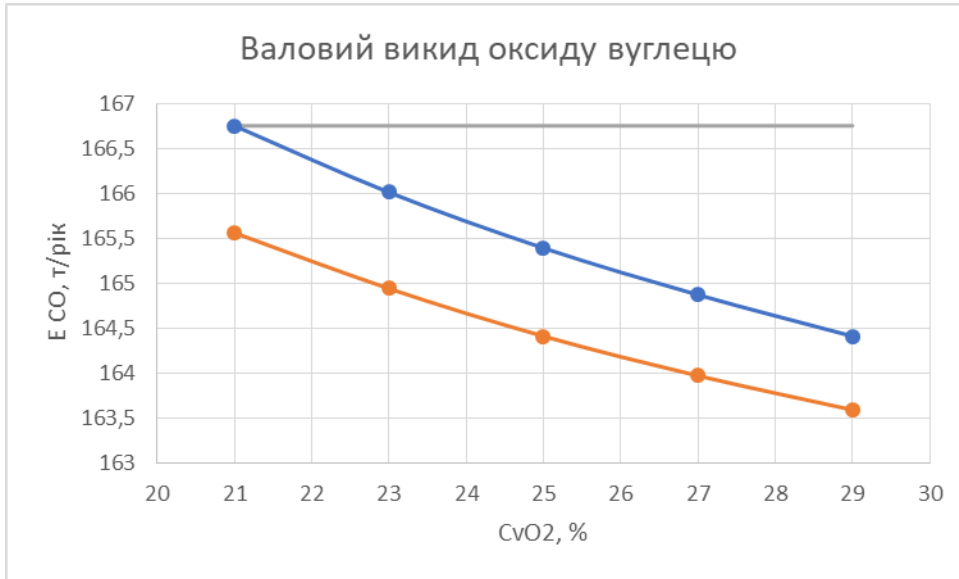
Викуди CO та NOx

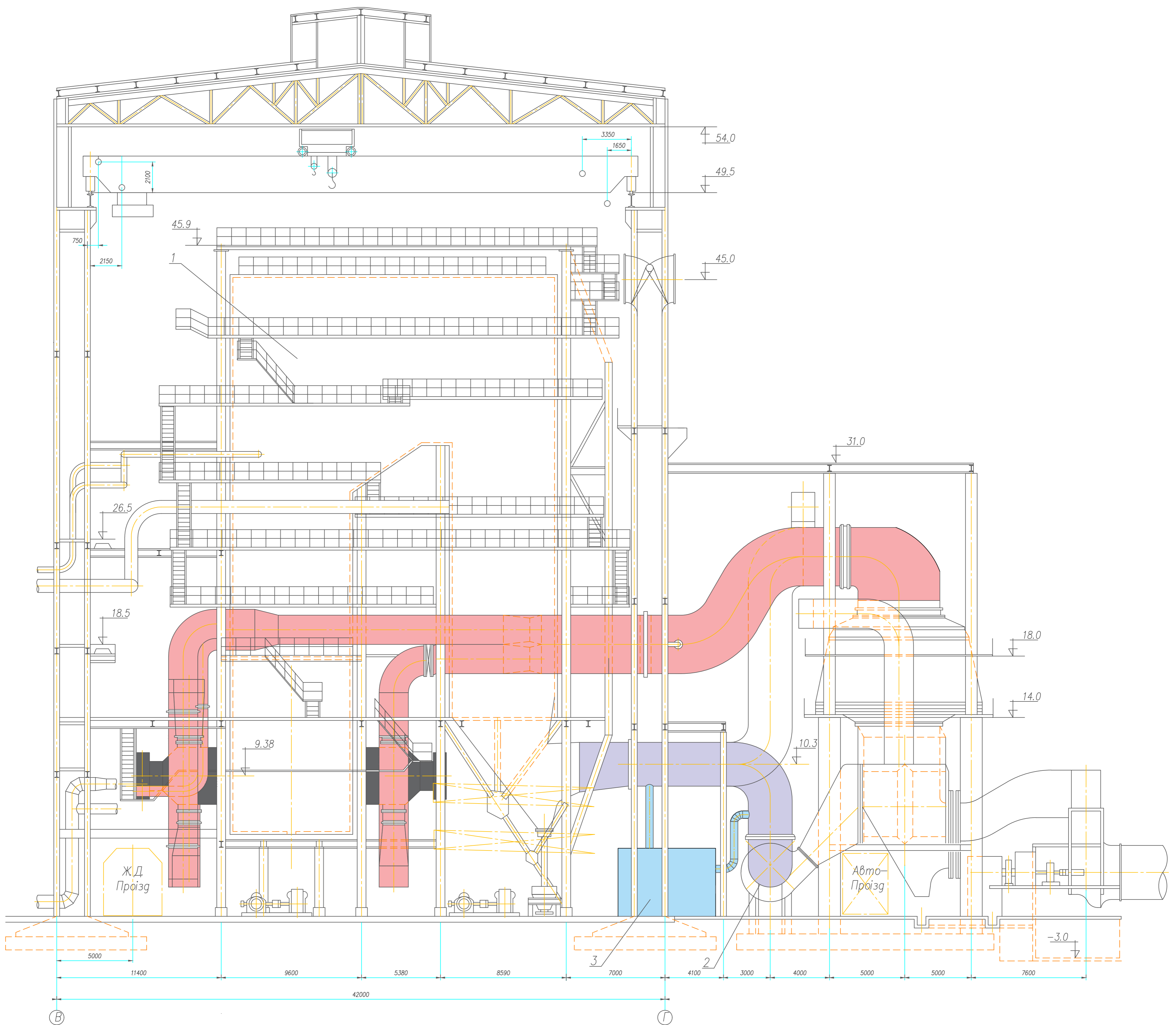
Викуди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря
Air emissions total and carbon dioxide emissions

	2010	2015	2020	2021	2022	
Тис.т / Thsd.t						
Викуди забруднюючих речовин, усього						Emissions total
від стаціонарних джерел	4131,6	2857,4	2238,6	2242,0	...	from stationary sources
Викуди діоксиду вуглецю						Carbon dioxide emissions
від стаціонарних джерел	165041,8	138932,1	109079,4	111854,2	...	from stationary sources

Викуди окремих забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення
Air emissions of some pollutants from stationary pollution sources

	2010	2015	2020	2021	2022	
Тис.т / Thsd.t						
Діоксид азоту	310,5	233,8	181,3	174,0	...	Nitrogen dioxide
Оксид вуглецю	1063,8	764,1	707,3	704,3	...	Carbon monoxide

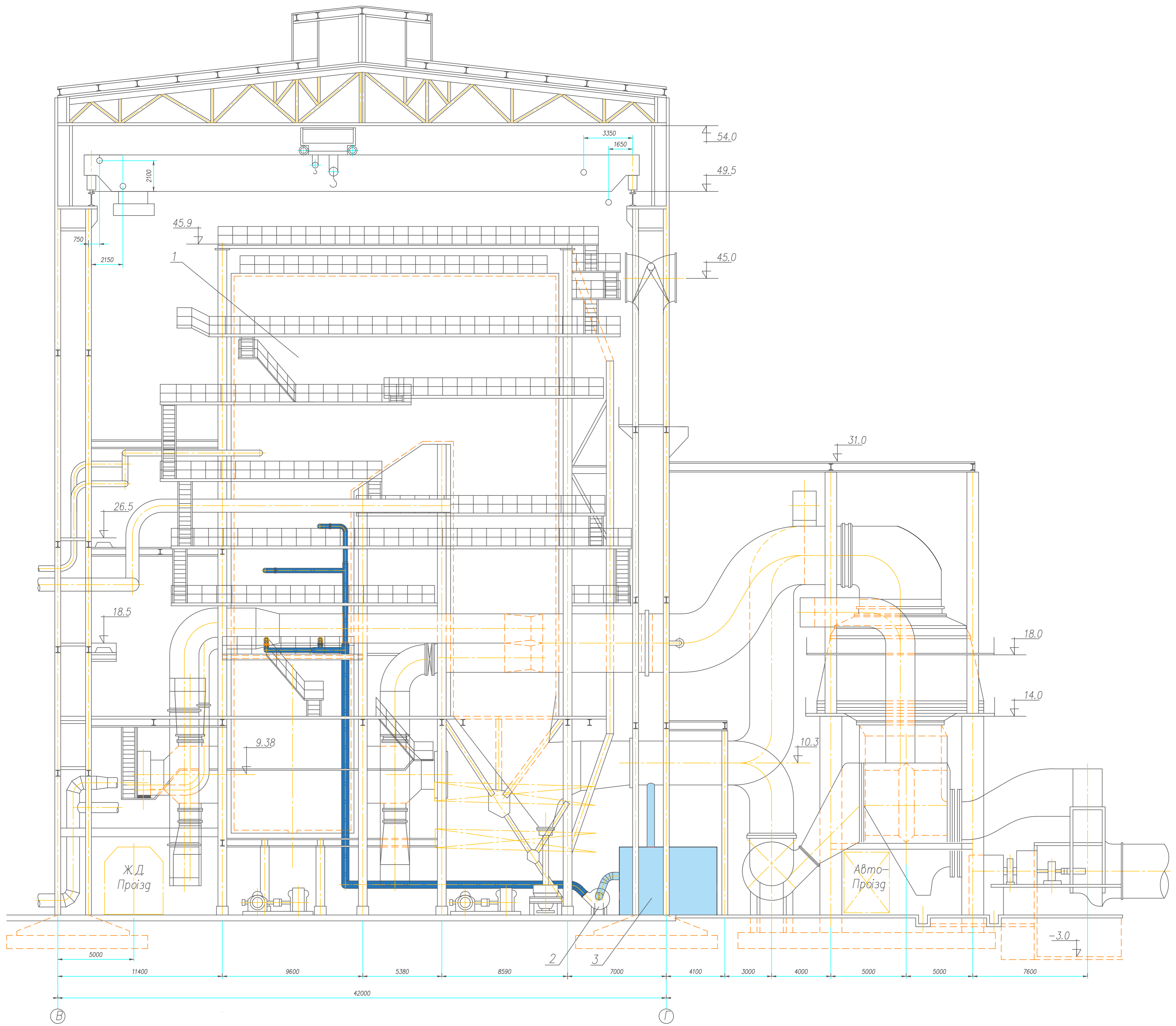




N поз.	Найменування обладнання
1	2
1	Котел паровий
2	Дуттьовий вентилятор
3	Мембранна установка

Атестаційна випускна робота магістра				Літера	Аркуш	Архів	
Зм.	Лист	№ док.	Підпис	Дата	MP	2	3
Розробив	Кишман К.А.						
Керівник	Гладзін П.М.						
Зав. каф.	Кириченко М.А.				ТЕМ-22		

Схема подачі збагаченого киснем дуттьового повітря в камеру згоряння



N поз.	Найменування обладнання
1	2
1	Котел паровий
2	Дутьовий вентилятор
3	Мембранна установка

Атестаційна випускна робота магістра				Літера	Аркуш	Архів
Зм.	Лист	№ док.	Підпис	Дата	MP	3
Розробила	Кишман К.А.					
Керівник	Гладзін П.М.					
Зав. каф.	Кириченко М.А.					
Схема подачі збагаченого киснем дутьового повітря в камеру охолодження					ТЕМ-22	

Висновки

Збагачення киснем дуттьового повітря призводить до:

- зменшення кількості теоретично необхідного повітря для спалювання палива;
- зменшення вмісту азоту в повітрі, що подається в топку;
- збільшення об'ємної частки трьохатомних газів та водяної пари в продуктах згоряння;
- інтенсифікації теплообмінних процесів в топці котла, а отже збільшення поглинання теплоти екранними поверхнями топки;
- зменшення кількості димових газів та їх температури;
- зменшення втрат теплоти з димовими газами;
- зростання коефіцієнту корисної дії котельного агрегату.

Недостатня кількість повітря відносно теоретично необхідного сприяє:

- мінімізації втрати теплоти з хімічним недопалом;
- зниження генерації викиду оксидів азоту NO_x .

Організація двоступеневого спалювання палива дозволяє:

- підвищити ефективність процесів спалювання;
- знизити викид NO_x на першому ступені;
- виключити викид оксиду вуглецю на другому ступені, шляхом доокиснення CO в CO_2 .

