

**КОМУНАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
“ОПОРНИЙ ЗАКЛАД ОСВІТИ МАЛОДАНИЛІВСЬКИЙ ЛІЦЕЙ”  
МАЛОДАНИЛІВСЬКОЇ СЕЛИЩНОЇ РАДИ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ**

**ПРОЄКТ НА ТЕМУ:  
«ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ  
ВІД ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ  
ПРИ РОБОТІ КОТЛІВ»**

Виконавець проекту:  
Ареф'єва Олександра Василівна,  
учениця 11-Б класу  
КЗ «Опорний заклад освіти  
Малоданилівський ліцей»  
Малоданилівської селищної ради  
Харківської області

Наукові керівники:  
Тютюнник Лариса Іванівна,  
к.т.н., доцент кафедри  
парогенераторобудування  
Національного технічного  
університету НТУ «ХП»  
Корнус Ірина Вікторівна  
вчитель хімії  
КЗ «Опорний заклад освіти  
Малоданилівський ліцей»  
вчитель вищої кваліфікаційної  
категорії, «вчитель-методист»

**Селище Мала Данилівка 2024**

## ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРИ	6
1.1. Екологічна ситуація в Харківській області	6
1.2. Джерела і рівні забруднення атмосферного повітря	7
РОЗДІЛ 2. ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ ВІД ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ ПРИ РОБОТІ КОТЛІВ	10
2.1. Вміст шкідливих домішок в продуктах згорання	10
2.2. Методи зниження концентрації оксидів нітрогену у топках котлів	13
2.3. Очищення продуктів згорання від оксидів нітрогену	15
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУ	20
3.1. Характеристики котла, роботу якого досліджували в проекті	20
3.2. Розрахунок концентрації оксидів нітрогену, що утворюються при спалюванні в енергетичних котлах, у різних видах палива	21
3.3. Обчислення і порівняння впливу ступеня рециркуляції продуктів згорання палива при різних коефіцієнтах рециркуляції і за відсутності ступінчастого спалювання палива	31
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38
ДОДАТКИ	39

## ВСТУП

Енергетика є основним рушійним чинником розвитку всіх галузей промисловості, комунального і сільського господарства, служить базою підвищення продуктивності і добробуту населення. Вона має найбільш високі темпи розвитку і масштаби виробництва. Саме тому темпи науково-технічного прогресу і поліпшення умов праці значною мірою визначаються станом енергетики і у всіх країнах світу їй приділяється величезна увага.

На сучасному етапі розвитку енергетики дуже важливою стає проблема її взаємодії з навколишнім середовищем. Екологічні умови функціонування енергетики пов'язані з унікальними масштабами матеріальної і теплової взаємодії з біосферою (атмосферою, гідросферою, літосферою). Це обумовлено тим, що, споживаючи величезну кількість первинних ресурсів у вигляді твердого, рідкого і газоподібного палив, енергетика разом з виробництвом електричної енергії і теплоти викидає в довкілля велику кількість відходів у вигляді газоподібних і твердих продуктів згорання. Відповідно до існуючих термодинамічних циклів ТЕС в довкілля надходить 60 % потенційної енергії палива: фізична теплота, що втрачається з відхідними газами, теплота нагрітої води. Крім цього, вироблені на ТЕС і АЕС електроенергія і теплота в процесі їх передачі і споживання також надходять у довкілля.

Слід зазначити також, що у зв'язку з розвитком ядерної енергетики відбулася зміна у взаємодії енергетики з довкіллям у бік зниження забруднення продуктами згорання шлаковими відходами, але при цьому виникли викиди АЕС, що є не менш небезпечні за впливом на біосферу, ніж викиди ТЕС.

Оскільки органічне паливо на сьогоднішній день є основним джерелом виробництва електроенергії і теплоти, то для запобігання збільшенню викидів шкідливих домішок необхідно впровадження економічно вигідних способів охорони довкілля.

Важливою стороною проблеми взаємодії енергетики і навколишнього середовища є і все більш зростаючий зворотний вплив – природа диктує умови ухвалення технічних рішень при проектуванні підприємств енергетики: вибір типу і одиничних потужностей енергетичного устаткування, вибір місця будівництва ТЕС, ГЕС, АЕС та ін.

В енергетичному балансі України теплові електричні станції (ТЕС) є основним джерелом теплової та електричної енергії. За видом енергії ТЕС підрозділяються на конденсаційні електростанції (КЕС), що виробляють енергії тільки одного виду – електричну і теплоелектроцентралі (ТЕЦ), які відпускають споживачам теплову та електричну енергію у вигляді пари і води.

Централізоване тепlopостачання споживачів, здійснюване з використанням тепла пари, частково відпрацьованої у проточній частині турбіни, забезпечує значну економію палива, погіршує якість тепlopостачання, зменшує забрудненість навколишнього середовища. Встановлена потужність теплофікаційних турбін становить 39% сумарної потужності теплових електростанцій.

Теплові електростанції та їх обладнання невпинно розвиваються, стають більш потужними і складними. Зростання потужності ТЕС здійснюється на базі нових науково-технічних рішень із застосуванням сучасних систем автоматизованого управління виробничими процесами.

Підвищення енергетичного потенціалу робочого тіла (пари) за рахунок збільшення початкових параметрів пари перед турбіною до значень 12,75 МПа і 23 МПа, а також введення проміжного перегріву пари підняли економічність агрегатів на 10-15 %. При блочному виконанні (котел-турбіна-генератор-трансформатор) вартість ТЕЦ знижується 15-20% порівняно з іншими компоновками. Всі великі ТЕС мають блочне виконання.

Актуальність роботи полягає в тому, що серед речовин, які підлягають постійному контролю, оксиди нітрогену, які утворюються при роботі газомазутних котлів, займають одне з провідних місць тому, що шкідливо діють на органи дихання,

викликають ряд серйозних захворювань, а також сприяють утворенню смогу і погіршенню видимості.

Об'єктом дослідження є котел 4 КВ-ГМ-100 (Дорогобужкотломаш).

У роботі використані наступні методи досліджень: збір, систематизація даних; методи математичної статистики обробки результатів.

Мета дослідження – визначити можливість зниження концентрації викидів оксидів нітрогену у довкілля при роботі енергетичних котлів.

Для реалізації поставленої мети вирішувались наступні завдання:

- зібрати інформацію про вміст шкідливих домішок у продуктах згоряння в котельних установках;
- вивчити особливості можливих методів зниження концентрації оксидів нітрогену у топках котлів;
- здійснити розрахунок концентрації оксидів нітрогену, що утворюються при застосуванні різних видів палива;
- здійснити оцінку ефективності застосування технологічних і режимних заходів щодо зниження викидів оксидів нітрогену у довкілля;
- порівняти концентрації оксидів нітрогену при номінальному навантаженні котла і часткових навантаженнях з метою визначення можливих заходів щодо захисту довкілля від шкідливих викидів;
- оцінити вплив ступеня рециркуляції продуктів згоряння палива і відсутності ступінчастого спалювання палива.

Наукова новизна роботи полягає у проведенні розрахунків з метою визначення можливості зниження концентрації викидів оксидів нітрогену у довкілля при роботі енергетичних котлів.

Практичне значення даного проекту полягає в тому, що отримані дані можуть бути використані: екологами при розробці програми поліпшення стану навколишнього природного середовища; учителями для просвітницького та екологічного виховання школярів.

## РОЗДІЛ 1

### ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРИ

#### 1.1. Екологічна ситуація в Харківській області

Сучасний екологічний стан в Україні характеризується інтенсивним забрудненням довкілля. Головними джерелами забруднення навколишнього середовища є промислові підприємства, об'єкти енергетичної галузі тощо.

Викликає тривогу й стан атмосферного повітря регіону. Основними забруднювачами атмосферного повітря в області є підприємства – Зміївська ТЕС, Харківська ТЕС – 5, управління магістральних газопроводів.

Зміївська ТЕС – основне джерело забруднення Харківської області. Викиди цієї станцією забруднюючих речовин в атмосферу склали в минулому році 134,7 тис. тонн (70% від загального об'єму викидів по області від стаціонарних джерел).

Високий рівень забруднення об'єктів довкілля в Україні призводить до деградації екосистем, підвищення рівня захворюваності населення та погіршення демографічних показників.

На сьогоднішній день кожен з нас, враховуючи складні екологічні проблеми, відчуває необхідність вирішити їх для покращення життя людей.

#### 1.2. Джерела і рівні забруднення атмосферного повітря

Відомо, що людина здатна прожити декілька тижнів без їжі, декілька днів без води, а без повітря – декілька хвилин. Враховуючи, що за добу людина вживає в середньому близько 1 кг їжі, до 2,5 л води и 12 кг повітря, стає зрозумілим, що чисте

повітря – головний, найважливіший продукт вживання. Тим більше, що дихати доводиться завжди – незалежно від того, забруднене повітря чи ні, отруйне або чисте.

Що ж таке повітря? Не дивлячись на те, що людина мешкає на дні «повітряного океану», вона вивчила повітря значно пізніше, ніж інші речовини. Це пояснюється тим, що повітря невидиме, не має ні смаку ні запаху. Лише в кінці XVIII століття А. Лавуаз'є визначив склад повітря. До його складу входять: азот – 78%, кисень – 21%, вуглекислий газ – 0.03%, аргон – 0.93%. У повітрі присутні ще пил, водяна пара і багато домішок різних газів.

Різновид і концентрація токсичних речовин, які входять до складу атмосфери сучасних міст і промислових центрів, збільшуються з кожним роком.

Забруднення атмосфери дорого обходиться людині і природі. Основною шкодою від забруднення ще донедавна вважали зниження видимості через чорну димову завісу, яка часто висіла над промисловими центрами. Сьогодні зниження видимості створює значні перепони торговим перевезенням, особливо повітряному транспорту. Тим не менш якість видимості не є основним показником загального забруднення атмосфери. Газові й радіоактивні викиди створюють значно більш сильне забруднення атмосфери без будь-якого порушення видимості. І все ж таки погана видимість – ознака того, що доступ сонячної енергії до Землі зменшується.

Це сприяє тривалому застою смогу (суміш туману і диму з частинками мінерального, органічного і фотохімічного характеру) в нижніх пластах атмосфери. Раніше дуже часто говорили про «смогову хворобу», появу якої ставили в пряму залежність від ступеня забруднення повітря. Смог поглинає до 50% ультрафіолетових променів, 25% сонячного випромінювання.

Отже, найбільшу шкоду для здоров'я людини спричиняє забруднене повітря. Клініко-епідеміологічні дослідження вказують на пряму залежність захворюваності і смертності населення від забруднення повітря. Але, аналізуючи механізм впливу забруднювачів на організм людини, потрібно вказати, що димовий смог є причиною руйнування органів дихання, захворювань легень (емфізема, бронхіт, астма);

фотохімічний смог викликає подразнення слизових оболонок очей, носа, гортані; оксиди азоту, легко поглинаючись кров'ю, дуже шкідливо діють на легені і очі; кіптява, адсорбуючи в собі канцерогенні речовини, сприяє розвитку рака легень; фенол спричиняє складні порушення обміну речовин в організмі; озон, як і сірчистий ангідрид, в малих концентраціях є причиною хронічного бронхіту, а в високих – викликає набряк легень. Дуже шкідливі для організму у великих концентраціях оксиди Карбону і сірководень. Цікаво, що подразнення легень одним із шкідливих агентів прискорює «вторгнення» у кров інших потенціально шкідливих агентів. Розчинені у крові аерозолі швидко поширюються по всьому організму.

Дуже шкідливі для людини, навіть в невеликих концентраціях, Берилій і його сполуки. Вони викликають хронічні захворювання легень (хронічний грануломатоз, беліоз); Манган і його сполуки викликають пневмонію; радіоактивні ізотопи (Йод – 131, Фосфор – 31, Кобальт – 60, Стронцій – 90, Сульфур – 35, Кальцій – 45, Золото – 198, Радій – 226, Уран – 235, Уран – 236) вражають тканини і органи людини. Вони є причиною зміни крові, анемії, вроджених каліцтв, лейкемії, приводять до зниження активності щитовидної залози, к порушенню діяльності статевих залоз, вражають легені та прискорюють фіброз і ракові захворювання; канцерогенні речовини (3,4-бензапірен, ароматичні вуглеводні) є причиною раку; пари ртуті згубно впливають на мозок людини.

Забруднене повітря страшене й своєю повсякденністю. Всупереч різним теоріям про невичерпність повітряного океану, про здатність людини «приживатися», «приспосовуватися» до навколишнього середовища, забруднювачі повітря володіють кумулятивним ефектом – можливістю нагромаджувати в людському організмі отруту, дію якої до певного часу важко помітити. Коли приховане стає явним, рятувати людину (людей!) буває іноді пізно. Надзвичайно важливе значення має і потенціальна можливість генетичних змін під впливом забрудненого повітря в носіях спадковості. Антропологічні дослідження показують, що фізичний і розумовий розвиток дітей в



промислових районах відстає від розвитку дітей в районах з менш забрудненим повітрям.

Забруднення атмосферного повітря у всьому світі настільки сильне, що уже давно викликає серйозне хвилювання у світової громадськості. Все більше і більше уваги приділяє цій проблемі Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). Вона виявила основні джерела забруднення, а саме:

А) підприємства промисловості чорних металів (металургія і ливарне виробництво);

Б) підприємства промисловості кольорових металів (виробництво і переробка);

В) підприємства із виробництва цементу;

Г) підприємства хімічної промисловості;

Д) підприємства коксового виробництва (кокові і газові заводи);

Е) підприємства нафтової промисловості.

Якщо при нормальних умовах за весь час існування біосфери кисень оновлювався 800 тисяч разів внаслідок фотосинтезу (1 раз на 4 тис. років), то зараз сподіватися на це не має сенсу, бо концентрація токсинів така, що їх утилізація через біологічні механізми природи неможлива.

## РОЗДІЛ 2

### ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ ВІД ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ ПРИ РОБОТІ КОТЛІВ

#### 2.1. Вміст шкідливих домішок в продуктах згорання

У продуктах згорання органічного палива в котельних і промислових установках містяться тверді частинки сажі і незгорілого палива, оксиди сульфуру ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), нітрогену ( $\text{NO}_x$ ) і ванадію ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ). При неповному згоранні палива в димових газах містяться оксиди карбону ( $\text{CO}$ ),  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  і бенз(а)пірен  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ . Багато з газоподібних речовин руйнується в атмосфері протягом години і доби. Аерозольні тверді частинки такі, як, наприклад, сажа, ванадій(V) оксид, бенз(а)пірен, можуть накопичуватися на поверхні землі і беруть участь циркуляції атмосфери.

Забруднення шкідливими домішками атмосфери, ґрунтів і води погіршує санітарно-гігієнічний стан міст, селищ, полів, лісів, водоймищ, надаючи шкідливу дію на організм людину і рослинність, погіршує якість продукції підприємств, збільшує знос механізмів і руйнує будівельні конструкції будівель і споруд. По ступеню дії на людину шкідливі речовини поділяються на класи. До надзвичайно небезпечних відносяться  $\text{V}_2\text{O}_5$  і бенз(а)пірен. Ванадій(V) оксид утворюється в невеликій кількості при спалюванні мазуту. Бенз(а)пірен може з'являтися при спалюванні будь-якого палива при недостатчі кисню, а також виділятися при розкладанні сажі. Високонебезпечними є  $\text{NO}_2$  і  $\text{SO}_3$ . Оксиди нітрогену  $\text{NO}_x$  утворюються в зоні високих температур факела при  $1600^\circ\text{C}$ . Вихід  $\text{NO}_2$  складає приблизно 10%.  $\text{SO}_3$  утворюється на кінцевому етапі горіння палива з  $\text{SO}_2$  при надлишку кисню і за рахунок каталізу на відкладеннях в пароперегрівачі. Його вихід складає 2-5%  $\text{SO}_2$ . У зоні низькотемпературних поверхонь нагріву  $\text{SO}_3$  перетвориться в пари  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і витрачається в процесі низькотемпературної корозії. Ступінь небезпеки дії шкідливої речовини на живий організм визначається відношенням його концентрації до гранично

допустимої (ГДК),  $\text{мг/м}^3$ , в повітрі на рівні дихання людини:  $k_i = c_i / \text{ГДК}$ . Значення повинне бути  $k_i$  менше 1. При одночасному вмісті в повітрі декількох шкідливих речовин ступінь небезпеки оцінюють шляхом складання токсичних кратностей за формулою 2.1.1:

$$\frac{C_{NO_2}}{\text{ГДК}_{(NO_2)}} + \frac{C_{NO}}{\text{ГДК}_{(NO)}} + \frac{C_{SO_2}}{\text{ГДК}_{(SO_2)}} + \frac{C_{SO_3}}{\text{ГДК}_{(SO_3)}} + \frac{C_{CO}}{\text{ГДК}_{(CO)}} < 1, \quad (2.1.1)$$

де  $C$  – концентрація певної речовини,  $\text{моль/см}^3$ ;

ГДК – гранично-допустима концентрація тієї самої речовини.

Для викиду твердих частинок за формулою 2.1.2:

$$\frac{c_{зл}}{\text{ПДК}_{(зл)}} + \frac{c_c}{\text{ПДК}_{(c)}} + \frac{c_{V_2O_5}}{\text{ПДК}_{(V_2O_5)}} < 1, \quad (2.1.2)$$

де індекси «зл» і «с» - золіві елементи та сажі.

Одним з актуальних сучасних завдань є забезпечення чистоти повітряного басейну. Для цього необхідне очищення продуктів згорання палива, що видаляються з котлів після їх охолодження в атмосферу, від шкідливих речовин. У країнах колишнього СНД встановлене обов'язкове очищення продуктів згорання від твердих частинок попелу і незгорілого палива і проводиться інтенсивна робота по дослідженню доцільних способів очищення газів від оксидів сульфуру і нітрогену.

Для можливості встановлення можливого ризику для здоров'я населення необхідно знати гранично допустимі концентрації вказаних вище речовин.

Гранично допустимі концентрації деяких речовин наведено в таблиці 2.1.

## Гранично допустимі концентрації деяких шкідливих речовин у повітрі

Речовина	Формула	У населених пунктах	
		Максимально разова, мг/м <sup>3</sup>	Середньодобова, мг/м <sup>3</sup>
Нітроген (IV) оксид	NO <sub>2</sub>	0,085	0,085
Нітроген (II) оксид	NO	0,25	0,25
Сульфур (VI) оксид	SO <sub>3</sub>	0,30	0,10
Сульфур (IV) оксид	SO <sub>2</sub>	0,50	0,050
Карбон (II) оксид	CO	3,0	1,00
Бенз(а) пірен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	-	10-6
Ванадій (V) оксид	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,002
Сажа	-	0,15	0,05
Пил (золоті частинки)	-	0,50	0,15
Сірководень	H <sub>2</sub> S	0,008	0,008

За даними таблиці 2.1 можна зробити висновок про ступінь токсичності оксидів нітрогену. Так, максимально-разова, гранично допустима концентрація нітроген (II) оксиду майже в 6 разів нижча, ніж ГДК для сульфур (IV) оксиду, і в 30 разів менше, ніж для карбон (II) оксиду. Оксиди нітрогену утворюються за рахунок окиснення нітрогену, що міститься в паливі і азоту повітря і містяться в продуктах згорання всіх палив – вугілля, мазуту і природного газу. Умовою окиснення азоту повітря є дисоціація молекули кисню повітря під дією високих температур у топці (1900-2000 °С):

## 2.2. Методи зниження концентрації оксидів нітрогену у топках котлів

Відомо, що оксиди нітрогену шкідливо діють на органи дихання живих організмів і викликають ряд серйозних захворювань, а також діють на устаткування і матеріали, сприяють утворенню смогів і погіршенню видимості.

В результаті реакцій в топковій камері утворюється в основному нітроген (II) оксид NO (більше 95%). Утворення нітроген (IV) оксиду NO<sub>2</sub> за рахунок доокиснення NO вимагає значного часу і відбувається при низьких температурах на відкритому повітрі. Таким чином, на виході з димаря склад оксидів нітрогену майже не змінюється в порівнянні з топковою камерою і лише в атмосфері відбувається процес його поступового доокиснення. Концентрація оксидів нітрогену в газах котлів, що виділяються, знаходиться в межах від 0,1 до 1,3 г/м<sup>3</sup>. Кількість оксидів нітрогену, що утворюються при горінні, залежить від рівня і розподілу температур, тобто залежить від рівня і розподілу температур, і залежить від співвідношення швидкості горіння і швидкості відведення теплоти від факела.

Найбільший вихід оксидів нітрогену характерний для висококалорійних сортів палива і форсованих топков. У воді NO практично не розчиняється. Очищення продуктів згорання від NO і інших оксидів нітрогену є технічно складним процесом і в більшості випадків економічно нерентабельним. Унаслідок цього зусилля треба спрямовувати в основному на зниження утворення оксидів нітрогену в топках котлів.

Утворення оксидів нітрогену в процесі горіння палива зменшується при зниженні температури горіння, при скороченні часу перебування азоту і кисню у високотемпературній частині факела, а також при зменшенні кількості вільного кисню у факелі. Аналіз основних чинників, що впливають на утворення оксидів нітрогену, дозволяє намітити методи їх зменшення в топці.

Радикальним способом зниження утворення оксидів нітрогену є організація двохстадійного спалювання палива, тобто застосування двоступінчатих пристроїв. По цьому в первинну зону горіння подається 50-70% необхідного для горіння повітря,

решта частини повітря (50-30%) поступає в другу зону, де відбувається допалювання продуктів неповного згорання.

Необхідно, щоб відведення теплоти з первинної зони горіння було достатньо великим, щоб завершальна стадія процесу горіння відбувалася при нижчій температурі.

У даний час проводяться дослідження роботи пальчикових пристроїв для двохстадійного горіння або отримання розтягнутого по довжині топкової камери факела, що повинно забезпечувати значне зниження температурного рівня в топку і відповідно зменшення утворення оксидів нітрогену.

Іншим методом зменшення утворення оксидів нітрогену в топці є рециркуляція димових газів в топкову камеру. В цьому випадку димові гази при температурі 300-400 °С рухаються з конвективної шахти котла і подаються в топкову камеру. Введення газів в топкову камеру може здійснюватися через шліци під пальниками, через кільцевий канал навколо пальників або шляхом додавання газів у повітря перед пальниками.

Як показали дослідження, найбільш ефективним виявився останній спосіб, при якому відбувається найбільше зниження температури в ядрі факела. Додаючи до 20-25% димових газів, вдається понизити зміст оксидів нітрогену на 40-50%. Рециркуляція газу, разом із зменшенням температури горіння, призводить до зниження концентрації кисню, тобто зменшенню швидкості горіння, розтягання зони горіння і ефективнішому охолодженню цієї зони топковими кранами.

Подача води і пари в зону горіння також призводить до зниження утворення оксидів нітрогену. Введення води або водяної пари в кількості 5-10% всієї кількості повітря знижує температурний рівень в топці, так само як і при введенні рециркулюючого газу.

Зниження температури підігріву і зменшення надлишку повітря в топці теж декілька зменшує утворення оксидів нітрогену, як за рахунок зниження температурного рівня в топці, так і за рахунок зменшення концентрації вільного кисню.

Зазначені вище способи при комплексному їх використанні можуть істотно понизити утворення оксидів нітрогену в топці.

У таблиці 2.2 наведено орієнтовні усереднені попередні дані відповідно ефективності різних способів зниження утворення оксидів нітрогену в топках котлів.

Таблиця 2.2

Методи зниження NO<sub>2</sub>

Паливо	Методи зниження NO <sub>2</sub>					
	Малі значення $\alpha_T$	Двоступінчатє горіння	Двоступінчатє горіння при малих $\alpha_T$	Рециркуляція	Рециркуляція при малих $\alpha_T$	Уприскування води або пари
Природний газ	33	50	90	33	80	10
Мазут	33	40	73	33	70	10
Вугілля	25	35	60	33	55	10

З таблиці 2.2 видно, що за рахунок комбінації різних заходів виділення оксидів нітрогену на природному газі можна скоротити в 5-10 разів, на мазуті приблизно в 3 рази, на твердому паливі в 2 рази.

**2.3. Очищення продуктів згорання від оксидів нітрогену**

У процесі спалювання палива утворюються оксиди нітрогену. Реакція утворення оксидів нітрогену має ланцюговий механізм і протікає з поглинанням теплоти,

наприклад:  $N_2+O_2=2NO$  - 90 кДж/моль. Залежність рівноважної концентрації оксиду нітрогену ( $NO$ )<sub>p</sub> і часу від температури показана на Рис 2.1.

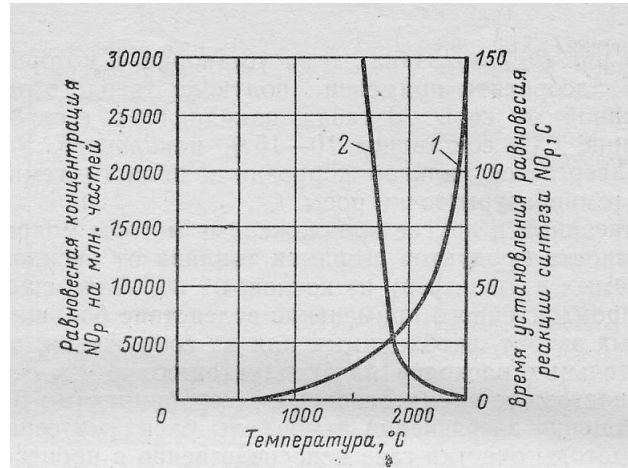


Рисунок 2.1. Залежність рівноважної концентрації оксиду нітрогену і часу її встановлення від температури

- 1 – рівноважна концентрація  $NO_p$ ;
- 2 – час встановлення концентрації  $NO_p$

Зменшення температури горіння різко знижує рівноважну концентрацію оксиду нітрогену і одночасно збільшує час, необхідний для встановлення цієї концентрації. У котлах при температурах в топці 1400-1500<sup>0</sup>C час перебування газів у факелі в 100 разів менше за необхідний для досягнення рівноважної концентрації, і концентрації утворення оксиду нітрогену складає  $NO=(0,050,15) \div pNO$ , де  $pNO$  – парціальний тиск оксиду нітрогену. Надлишок азоту прискорює реакцію, але одночасно його збільшення знижує температуру горіння, що уповільнює реакцію. При невеликому надлишку повітря істотніше вплив першого чинника, при великому – другого. Впливає на збереження оксиду нітрогену швидкість охолодження газів (швидкість гартування). Унаслідок оборотності реакції оксиду нітрогену в газах зберігаються при швидкому їх



охолодженні. Наприклад, при  $\alpha = 1,3$  для збереження NO в кількості 0,6 швидкість гартування складає приблизно 6 К/с.

Охолоджений оксид нітрогену вступає в реакцію атмосферним киснем, внаслідок чого утворюється  $\text{NO}_2$ . Реакція залежить від концентрації реагентів і із зменшенням NO сповільнюється, при цьому в атмосферному повітрі зберігається NO. При подальшому охолодженні (нижче  $140^\circ\text{C}$ ) частина  $\text{NO}_2$  переходить в  $\text{N}_2\text{O}_4$ , частка якої збільшується у міру охолодження. За деяких умов утворюється  $\text{N}_2\text{O}$ . Таким чином, в атмосферному повітрі можуть утворюватися і існувати одночасно різні оксиди нітрогену при переважаючому вмісті  $\text{NO}_2$  і  $\text{N}_2\text{O}_4$ . Вміст оксидів нітрогену в продуктах згоряння, що йдуть з котлів, змінюється в широких межах (у перерахунку на NO від 0,015 до 0,15%) і залежить від потужності котла, характеристики палива і організації процесу горіння.

Залежність вмісту оксидів нітрогену від коефіцієнта надлишку повітря показана на Рис. 2.2.

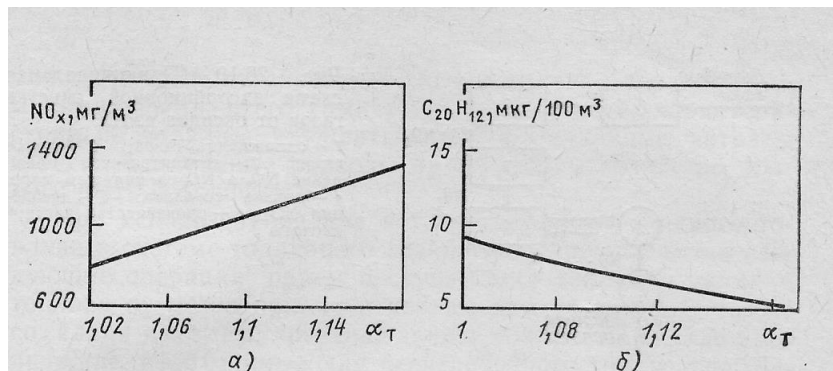


Рисунок 2.2 Залежність виходу  $\text{NO}_x$  (а) і  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  (б) від коефіцієнта надлишку повітря

У котельних установках очищення продуктів згоряння від оксидів нітрогену поки практично не застосовується. Найбільш реальним шляхом зниження вмісту оксидів нітрогену і бенз(а)пірена в продуктах згорання, що виділяються в атмосферу, є

зниження температури горіння і коефіцієнта надлишку повітря у області ядра факела в топці.

Скорочення викидів в атмосферу оксидів нітрогену димовими газами принципово може бути здійснено за такими напрямками:

- 1) застосування технології спалювання палива, що запобігає значному окисненню азоту повітря і палива, зокрема використання для горіння у якості окислювача кисню;
- 2) застосування рідких або твердих сорбентів, що поглинають з димових газів з подальшою регенерацією і отриманням товарних форм зв'язаного азоту;
- 3) каталітичне розкладання оксиду нітрогену на елементарний азот і кисень.

Другий і третій напрями використовуються при виробництві нітратної кислоти і характеризуються великими капітальними і експлуатаційними витратами. Лужна абсорбція включає хімічне скріплення азоту за реакціями типу:



При цьому поглинання азоту повинне передувати окиснення NO до NO<sub>2</sub>, що при концентраціях N < 0,05% вимагає величезних об'ємів колон, абсорбції. Принципового очищення димових газів від монооксиду нітрогену показана на Рис. 2.3.

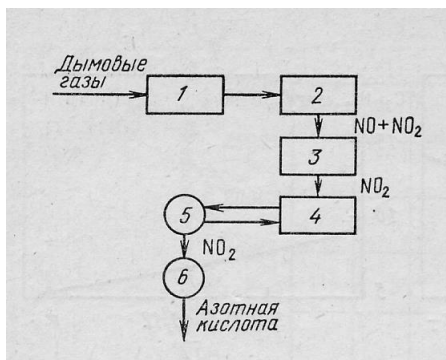


Рисунок 2.3. Принципова схема адсорбційного очищення газів від оксидів нітрогену

- 1 – охолодження газів;
- 2 – сушка газів;
- 3 – каталітичне окислення NO в NO<sub>2</sub> у киплячому шарі;
- 4 – подача сорбенту;
- 5 – десорбція NO<sub>2</sub>;
- 6 – виробництво нітратної кислоти

Впровадження адсорбційних методів очищення димових газів зв'язане з великими труднощами. При температурах газів, що йдуть з котлів, дуже знижуються поглинювальні місткості сорбентів. Малий парціальний тиск NO<sub>x</sub> вимагає величезних реакторних місткостей. Складним завданням є також регенерація реагенту, оскільки що виділяється NO<sub>2</sub> повинен мати високу концентрацію, інакше виникає проблема очищення використовуваного для регенерації сорбенту повітря.

Практично зменшення викидів оксидів нітрогену в атмосферу котлами найреальніше в даний час досягти шляхом застосування раціональної технології спалювання палива.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУ

### 3.1. Характеристики котла, роботу якого досліджували в проекті

Газомазутні котли теплопродуктивністю 100 Гкал/г (КВ-ГМ-100) виконані по П-образній схемі і можуть бути використані в опалювальному режимі (70-150 °С), так і в тепловому (100-150 °С), котли можуть бути використані для підігріву води до 200 °С.

Потокова камера котлів і задня стіна конвективної шахти закриті екранами з труб  $\varnothing 60 \times 3$  мм з кроком 64 мм. Конвективна поверхня нагріву котлів складається з трьох пакетом. Кожен пакет набирається з U-образних ширм, виконаних з труб  $\varnothing 28 \times 3$  мм. Ширми в пакетах розташовані паралельно фронту котла і розміщені таким чином, що їх труби утворюють шаховий пучок з кроком  $S_1=64$  мм і  $S_2=40$  мм. Бічні стіни конвективної шахти закриті трубами  $\varnothing 83 \times 3,5$  мм з кроком 128 мм, службовцями одночасно стояками ширм. Стояки зрушені щодо один одного на 64 мм, що забезпечує можливість розміщення ширм в плані шахти у вигляді гребінок з вказаними вище кроками шахового конвективного пучка. Всі труби, які утворюють екранні поверхні котла, вваренні безпосередньо в колектори  $\varnothing 273 \times 11$  мм.

Для видалення повітря з трубної системи при заповненні котла водою на верхніх колекторах встановлені повітряники. Вибухові запобіжні клапани встановлені на стелі топкової камери. Для видалення зовнішніх відкладень з труб конвективних поверхонь нагріву котли обладналися дробоочищувальною установкою.

Котли виконуються безкаркасними, нижні колектори фронтального, проміжного і заднього екранів, а також бічних стін конвективної шахти спираються на портал. Опора, розташована у середині нижнього колектора, розташована у середині нижнього колектора проміжного екрану, є нерухомою. Навантаження від бічних екранів топкової камери передається на портал через передню і задню стінки котла і частково через спеціальну ферму, встановленого на порталі. Помости котла кріпляться до стійок, що спираються на кронштейни portalу.

Обмуровка котла полегшена (натрубна, товщина близько 110 мм), складається з трьох шарів; шаматобетона, совелитових плит і мінераловатних матраців і магнезійної обмазки.

На фронтівій стінці котла КВ-ГМ-100 встановлюються три газомазутні пальника з ротаційними форсунками, причому третій пальник розміщується зверху в другому ряду (пальник РГМГ-30). Пальники встановлюються на повітряному коробі котла, який кріпиться на фронтальному екрані до горизонтальних колекторів. Кожен пальник типу РГМГ має вентилятор первинного повітря. Для пальника РГМГ-30 встановлюється вентилятор ЗОЦС85.

Котли комплектуються пристроєм відбору проб пари і води. Трубна частина котла поставляється підприємством-виробником транспортабельними блоками. Технічні характеристики котла 4 КВ-ГМ-100 (Дорогобужкотломаш), роботу якого досліджували в даному проекті, наведено у Додатку А. Додаткові початкові дані для розрахунку наведено у Додатку Б.

### **3.2. Розрахунок концентрації оксидів нітрогену, що утворюються при спалюванні в енергетичних котлах, у різних видах палива**

При розрахунку концентрації термічних оксидів нітрогену  $NO_2^{mp}$  визначальними параметрами є: максимальна температура факела; температурний інтервал реакції окиснення нітрогену, що входить до складу дуттьового повітря, і час перебування продуктів згорання в топковій камері. Максимальна температура факела залежить від умовної адіабатичної температури в зоні горіння,  $D_o$ , яка визначається таким чином:

$$T'_a = \frac{Q'_m}{V_2^0 C'_2 + 1,016(\alpha_{гор} - 1) \cdot V_6^0 C'_6} + 273 \quad (3.1)$$

де  $Q'_m$  – тепловиділення в зоні горіння, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), яке визначається за формулою 3.2:

$$Q_m' = Q_n^p + Q_{zg} + Q_{ml} \quad (3.2)$$

де  $Q_n^p$  – нижча теплота згорання палива, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_{ml}$  – фізична теплота палива кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), при обчисленнях можна нею нехтувати зважаючи на незначність;

$Q_{zg}$  – теплота, що вноситься гарячим повітрям в топку, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), яка визначається за формулою:

$$Q_{zg} = (\alpha_m - \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_{nl}) \cdot I_{zg}^0 + (\Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{nl}) \cdot I_{xg}^0 \quad (3.3)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт надлишку повітря в топці;

$\Delta\alpha_m$  – присос повітря в топку;

$\Delta\alpha_{nl}$  – присоси повітря в пилосистемі, при спалюванні природного газу прийняти

$\Delta\alpha_{nl}=0$ ;

$I_{zg}^0$  – ентальпія гарячого повітря, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>);

$I_{xg}^0$  – ентальпія холодного повітря, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>).

З метою спрощення розрахунку і у зв'язку з невеликою кількістю теплоти, що вноситься присосами холодного повітрям, другим доданком рівняння (3.3) можна знехтувати.

$V_z^0$  – теоретичний об'єм продуктів згорання палива при  $\alpha=1$ , м<sup>3</sup>/кг; (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), визначається за даними [1];

$V_g^0$  – теоретичний об'єм повітря, необхідного для повного згорання палива при  $\alpha=1$ , м<sup>3</sup>/кг; (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); визначається за даними [1];

$\alpha_{zop}$  – коефіцієнт надлишку повітря в зоні горіння, який визначається за формулою:

$$\alpha_{\text{зоп}} = \alpha_m - 0,5\Delta\alpha_m \quad (3.4)$$

Ентальпія гарячого повітря, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{\text{з.в.}}^0 = V_{\text{в.}}^0 \cdot C'_{\text{в.}} \cdot t_{\text{з.в.}} \quad (3.5)$$

Середні теплоємності продуктів згорання палива і повітря можуть бути визначені за довідковими даними при певних значеннях адіабатичної температури горіння, °С і за допомогою наступних залежностей:

теплоємність продуктів згорання при спалюванні природного газу, кДж/м<sup>3</sup>К:

$$C'_z = 1,57 + 0,134K_t \quad (3.6)$$

теплоємність повітря, кДж/м<sup>3</sup>К:

$$C'_g = 1,46 + 0,092K_t \quad (3.7)$$

$K_t$  – коефіцієнт, що враховує залежність теплоємності від температури:

$$K_t = \frac{t_a - 1100}{1000} \quad (3.8)$$

де – очікувана адіабатична температура горіння, яка може бути визначена за наступною залежністю для природного газу:

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{\text{зоп}}} \cdot (1 + 0,36 \cdot Q'_m \cdot 10^{-5}) \quad (3.9)$$

У першому наближенні замість  $Q'_m$  слід підставляти у формулу (3.9) нижчу теплоту згорання палива  $Q_{\text{найнижча}}^{\text{розрахункова}}$ .

$$\mathbf{1\text{-е наближення:}} \quad \alpha_{\text{гор}} = 1,1 - 0,5 * 0,06 = 1,07$$

$$t_a = \frac{1950}{1,07} * (1 + 0,36 * 37332,9 * 10^{-5}) = 2067,36^{\circ}\text{C}$$

$$T_a = 2067,36 + 273 = 2340,36\text{K}$$

$$K_t = \frac{2067,36 - 1200}{1000} = 0,867$$

$$C'_B = 1,46 + 0,092 * 0,867 = 1,539 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$$

$$C'_r = 1,57 + 0,134 * 0,867 = 1,686 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$$

$$I_{\text{г.в.}}^0 = 9,96 * 1,539 * 342 = 5242,326 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{\text{г.в.}} (1,1 - 0,06) * 5242,326 = 5452,019 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q'_m = 8910 * 4,19 + 5452,019 = 42784,919 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$T'_a = \frac{42784,919}{11,16 * 1,686 + 1,016 * (1,07 - 1) * 9,96 * 1,539} + 273 = 2422,455\text{K}$$

Після визначення значення умовної адиабатичної температури горіння за формулою (3.1) необхідно порівняти його з набутого за формулою (3.9) значення  $T_a = t_a + 273$ . Якщо розбіжність перевищує 50 К ( $50^{\circ}\text{C}$ ), то слід задатися новим значенням  $T_a$  і уточнити величини теплоємностей продуктів згорання палива і повітря.

$$\Delta T_a = 82,095 > 50\text{K}$$

$$\mathbf{2\text{-е наближення:}} \quad \alpha_{\text{гор}} = 1,1 - 0,5 * 0,06 = 1,07$$



$$t_a = \frac{1950}{1,07} * (1 + 0,36 * 42784,919 * 10^{-5}) = 2103,13^{\circ} \text{C}$$

$$T_a = 2103,13 + 273 = 2376,13 \text{K}$$

$$K_t = \frac{2103,13 - 1200}{1000} = 0,903$$

$$C'_b = 1,46 + 0,092 * 0,903 = 1,543 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$$

$$C'_r = 1,57 + 0,134 * 0,903 = 1,691 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$$

$$I_{r.b.}^0 = 9,96 * 1,543 * 342 = 5255,951 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{r.b.} (1,1 - 0,06) * 5255,951 = 5466,189 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$Q'_m = 37332,9 + 5466,189 = 42799,089 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$T'_a = \frac{42799,089}{11,16 * 1,691 + 1,016 * (1,07 - 1) * 9,96 * 1,543} + 273 = 2416,813 \text{K}$$

$$\Delta T_a = 40,683 < 50 \text{K}$$

Максимальна температура факела в зоні горіння палива з урахуванням відведення теплоти до екранів, ступеню вигорання палива і впливу рециркуляції продуктів згорання визначається за формулою:

$$T_m = \beta_{cz} \cdot T'_a \cdot (1 - \psi_{3z})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+nr}) \cdot m_z, \text{ K} \quad (3.10)$$

де  $\beta_{cz}$  – частка згорілого палива в зоні горіння, а для природного газу  $\beta_{cz} = 0,97-0,99$ ;

$\psi_{3z}$  – коефіцієнт теплової ефективності екранів в зоні ядра факела;

$r$  – коефіцієнт рециркуляції продуктів згорання в зону горіння (вибирається залежно від умови завдання);

$n$  – коефіцієнт, що враховує спосіб введення газів рециркуляції в топку, оскільки найбільш ефективним є введення газів через кільцевий канал навколо пальника, то в розрахунку слід прийняти  $n = 5,0$ .

$m_2$  – коефіцієнт, що враховує тип пальника  $m_2 = 1$  – для вихрових настінних пальників.

Теоретичний час досягнення рівноважної концентрації оксидів нітрогену NO при максимальній температурі факела  $T_m$  визначається за формулою:

$$\tau_0 = 0.024 \exp(54290/T_m - 23) \text{ с.} \quad (3.11)$$

Розрахунковий час реакції утворення оксидів нітрогену в топці:

$$\tau_P = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_z} \cdot \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0.5} \cdot \tau_{\text{преб}}, \text{ с} \quad (3.12)$$

де  $\Delta T_p$  – температурний інтервал реакції утворення оксидів нітрогену, який визначається за формулою:

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0.614 + T_m \cdot 10^{-5}}, \text{ К;} \quad (3.13)$$

$q_f$  – теплова напруга перетину топкової камери, МВт/м<sup>2</sup>;

$\Pi$  – розрахунковий периметр топкової камери, м, який знаходиться таким чином:

$$\Pi = 2a_T + 2b_T ; \quad (3.14)$$

$T''_z$  – абсолютна температура газів на виході з топки, К, яка береться з теплового розрахунку котла.

$\tau_{\text{преб}}$  – час перебування продуктів згорання в топковій камері, який визначається за формулою:

$$\tau_{\text{проб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \bar{T}_z \cdot g_z^n \cdot \alpha_m \cdot (1+r)} \quad (3.15)$$

де  $q_v$  – теплова напруга топкового об'єму, МВт/м<sup>3</sup>;

$\bar{T}_z$  – середня температура газів в топковій камері, К, яка розраховується за формулою:

$$\bar{T}_z = 0,84 \left[ (T_m)^4 + (T_z'')^4 \right]^{0,25}; \quad (3.16)$$

$g_z^n$  – питомий приведений об'єм газів при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup>/МДж, який приймається для природного газу  $g_z^n = 0,3$  м<sup>3</sup>/МДж;

$\xi$  – коефіцієнт заповнення перетину топки висхідним потоком газу, який приймається рівним при однофронтальному розташуванні пальників  $\xi = 0,75$ .

Концентрація термічних оксидів нітрогену, мг/м<sup>3</sup>, визначається наступною залежністю:

$$NO_2^{mp} = 7,03 \cdot 10^6 C_{O_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860/T_m) \frac{\tau_p}{\tau_0} \quad (3.17)$$

де  $C_{O_2}$  – концентрація залишкового (надмірного) кисню в зоні реакції, кг/м<sup>3</sup>, яка визначається за формулою:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_g^0 \cdot [(\alpha_{zop} - 1) + r \cdot (\alpha_{пу} - \alpha_{zop})] \cdot \rho_{O_2}}{[V_z^0 + (\alpha_{zop} - 1) \cdot V_g^0] \cdot (1+r)}, \quad (3.18)$$

де  $\alpha_{пу}$  – коефіцієнт надлишку повітря в газах рециркуляції;

$\rho_{O_2}$  – щільність кисню за нормальних фізичних умов  $\rho_{O_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$ .

У тих випадках, коли різниця  $(\alpha_{\text{зоп}} - 1)$  опиниться менше 0,02, необхідно вважати її рівною 0,02.

Спалювання природного газу характеризується швидшим протіканням реакцій горіння. В результаті цього скорочується зона активного горіння палива і тому (за інших рівних умов) концентрація оксидів нітрогену при спалюванні газоподібного палива дещо вищій, ніж при спалюванні твердого палива і мазуту (приблизно на 30%).

При розрахунку концентрації термічних оксидів нітрогену, що утворюються при спалюванні природного газу, у формулу (3.19) необхідно  $T_m$  підставити  $T'_m = 1,01T_m$  з метою обліку підвищеної швидкості горіння палива.

При спалюванні природного газу зважаючи на відсутність паливного азоту можуть утворюватися тільки «швидкі» оксиди нітрогену у зв'язку з наявністю вуглеводневих з'єднань. Концентрація «швидких» оксидів нітрогену,  $\text{мг/м}^3$ , визначається при цьому за формулою:

$$NO_2^{\sigma} = 10^2 \left[ \frac{\alpha_{\text{зоп}} + r}{1 + r} \right]^2 \left[ \frac{T'_m - 800}{1000} \right]^{0,33}, \quad (3.19)$$

$$T_m = 0,98 * 2416,813 * (1 - 0,43)^{0,25} * (1 - 0^{1+5*0}) * 1 = 2055,837\text{K}$$

$$\text{де } \beta_{\text{cr}} = 0,98; \psi_{\text{zc}} = 0,43; n = 5,0; m_r = 1$$

$$\tau_0 = 0,024 * \exp\left(\frac{54290}{2055,837} - 23\right) = 0,719\text{с}$$

$$\Delta T_p = \frac{(2055,837)^2 * 10^{-5}}{0,614 + 2055,837 * 10^{-5}} = 66,662\text{K}$$

$$\Pi = 2 * 5700 + 2 * 6240 = 23880\text{мм} = 23,88\text{м}$$

$$\tau_{\text{проб}} = \frac{273 * 0,75}{0,325 * 1813,77 * 0,3 * 1,1 * (1 + 0)} = 1,052\text{с}$$

$$\bar{T}_r = 0,84 * [(2055,837)^4 + (1403)^4]^{0,25} = 1813,77\text{K}$$

$$\text{де } \xi = 0,75; \vartheta_r^n = 0,3 \frac{\text{М}^3}{\text{МДж}}$$

$$\tau_p = \frac{66,662}{2422,455 - 1403} * \left(\frac{0,134 * 23,88}{300}\right)^{0,5} * 1,052 = 0,0075\text{с}$$

$$\text{NO}_2^{mp} = 7,03 * 10^6 * 0,0177^{0,5} * \exp\left(-\frac{10860}{2055,837}\right) * \frac{0,0075}{0,719} = 6,5 \frac{\text{МГ}}{\text{М}^3}$$

$$\text{де } C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 * 9,96 * [(1,07 - 1) + 0 * (1,13 - 1,07)] * 1,428}{[11,16 + (1,07 - 1) * 9,96] * (1 + 0)} = 0,0177 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$\text{NO}_2^{mp} = 10^2 * \left[\frac{1,07 + 0}{1 + 0}\right]^2 * \left[\frac{2076,395 - 800}{1000}\right]^{0,33} = 123,87 \frac{\text{МГ}}{\text{М}^3}$$

$$\text{де } T'_m = 1,01 * 2055,837 = 2076,395\text{K}$$

При спалюванні природного газу у зв'язку з відсутністю в ньому паливного азоту сумарна концентрація оксидів нітрогену складає:

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{mp} + \text{NO}_2^{ув} \quad \text{МГ/М}^3 \quad (3.20)$$

$$\text{NO}_2 = 6,5 + 123,87 = 130,37 \frac{\text{МГ}}{\text{М}^3}$$

У випадку, якщо необхідно визначити сумарну концентрацію оксидів нітрогену,  $\text{МГ/М}^3$ , при відмінній номінальному навантаженню котельного агрегату, розрахунок концентрацій оксидів нітрогену здійснюється за формулою:

$$\text{NO}_2 = \left[\frac{D}{D_{ном}}\right] \text{NO}_2^{mp} + \left[\frac{D}{D_{ном}}\right]^{0,5} (\text{NO}_2^{мл} + \text{NO}_2^{ув}) \quad (3.21)$$

де  $D$  – часткове навантаження котельного агрегату, що виражається в частках від  $D_{ном}$ .

$$NO_2 = 0,6 * 6,5 + 0,6 * 123,87 = 78,222 \frac{МГ}{М^3}$$

$$NO_2 = 0,8 * 6,5 + 0,8 * 123,87 = 104,296 \frac{МГ}{М^3}$$

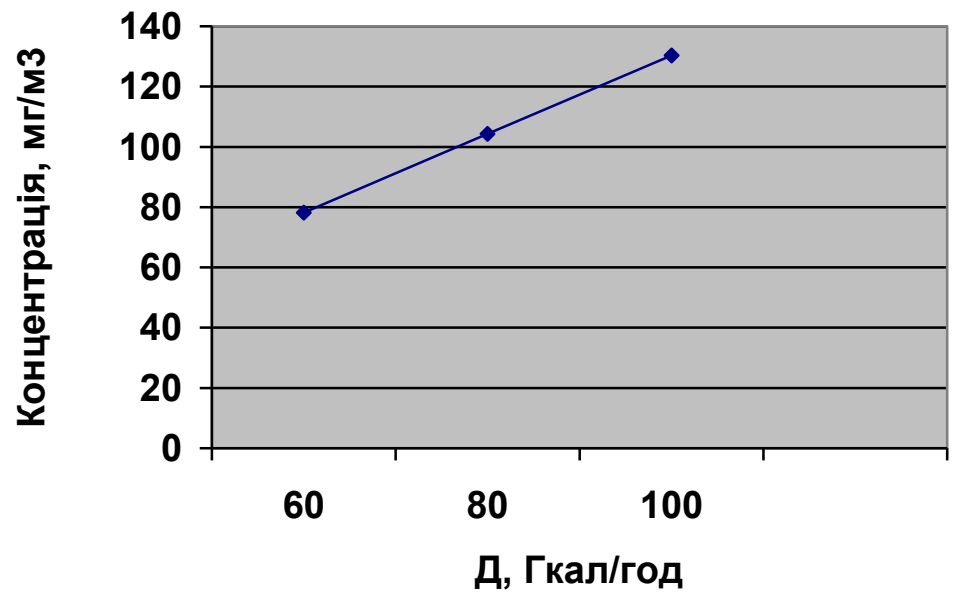


Рисунок 6. Графічна залежність  $C_{NO_2} = f(D)$

**3.3. Обчислення і порівняння впливу ступеня рециркуляції продуктів згорання палива при різних коефіцієнтах рециркуляції і за відсутності ступінчастого спалювання палива**

Максимальна температура факела в зоні горіння палива з урахуванням відведення теплоти до екранів, ступеню вигорання палива і впливу рециркуляції продуктів згорання визначається за формулою:

$$T_m = \beta_{ce} \cdot T_a' \cdot (1 - \psi_{зг})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+nr}) \cdot m_2, \text{ К} \tag{3.22}$$

де  $\beta_{cz}$  – частка згорілого палива в зоні горіння, а для природного газу  $\beta_{cz} = 0,97-0,99$ ;

$\psi_{з}$  – коефіцієнт теплової ефективності екранів в зоні ядра факела;

$r$  – коефіцієнт рециркуляції продуктів згорання в зону горіння (вибирається залежно від умови завдання);

$n$  – коефіцієнт, що враховує спосіб введення газів рециркуляції в топку, оскільки найбільш ефективним є введення газів через кільцевий канал навколо пальника, то в розрахунку слід прийняти  $n = 5,0$ .

$m_z$  – коефіцієнт, що враховує тип пальника  $m_z = 1$  – для вихрових настінних пальників.

Теоретичний час досягнення рівноважної концентрації оксидів нітрогену NO при максимальній температурі факела  $T_m$  визначається за формулою:

$$\tau_0 = 0.024 \exp(54290/T_m - 23) \text{ с.} \quad (3.23)$$

Розрахунковий час реакції утворення оксидів нітрогену в топці:

$$\tau_P = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_z} \cdot \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0.5} \cdot \tau_{преб}, \text{ с} \quad (3.24)$$

де  $\Delta T_p$  – температурний інтервал реакції утворення оксидів нітрогену, який визначається за формулою:

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0.614 + T_m \cdot 10^{-5}} \text{ К;} \quad (3.25)$$

$q_f$  – теплова напруга перетину топкової камери, МВт/м<sup>2</sup>;

$\Pi$  – розрахунковий периметр топкової камери, м, який обчислюють таким чином:

$$P = 2a_T + 2e_T ; \quad (3.26)$$

$T_z''$  – абсолютна температура газів на виході з топки, К, яка береться з теплового розрахунку котла.

$\tau_{\text{преб}}$  – час перебування продуктів згорання в топковій камері, який визначається за формулою:

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \bar{T}_z \cdot g_z^n \cdot \alpha_m \cdot (1+r)} \quad (3.27)$$

де  $q_v$  – теплова напруга топкового об'єму, МВт/м<sup>3</sup>;

$\bar{T}_z$  – середня температура газів в топковій камері, К, яка розраховується за формулою:

$$\bar{T}_z = 0,84 \left[ (T_M)^4 + (T_z'')^4 \right]^{0,25} ; \quad (3.28)$$

$g_z^n$  – питомий приведений об'єм газів при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup>/МДж, який приймається для природного газу  $g_z^n = 0,3$  м<sup>3</sup>/МДж;

$\xi$  – коефіцієнт заповнення перетину топки висхідним потоком газу, який приймають рівним при однофронтальному розташуванні пальників  $\xi = 0,75$ .

Концентрація термічних оксидів нітрогену, мг/м<sup>3</sup>, визначається за залежністю:

$$NO_2^{mp} = 7,03 \cdot 10^6 C_{O_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860/T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0} \quad (3.29)$$



де  $C_{O_2}$  – концентрація залишкового (надмірного) кисню в зоні реакції,  $\text{кг/м}^3$ , яка визначається за формулою:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_g^0 \cdot [(\alpha_{zop} - 1) + r \cdot (\alpha_{pu} - \alpha_{zop})] \cdot \rho_{O_2}}{[V_z^0 + (\alpha_{zop} - 1) \cdot V_g^0] \cdot (1 + r)}, \quad (3.30)$$

де  $\alpha_{pu}$  – коефіцієнт надлишку повітря в газах рециркуляції;

$\rho_{O_2}$  – щільність кисню за нормальних фізичних умов  $\rho_{O_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$ .

У тих випадках, коли різниця  $(\alpha_{zop} - 1)$  стає менше 0,02, необхідно приймати її рівної 0,02.

Спалювання природного газу характеризується швидшим протіканням реакцій горіння. В результаті цього скорочується зона активного горіння палива і тому (за інших рівних умов) концентрація оксидів нітрогену при спалюванні газоподібного палива дещо вищий, ніж при спалюванні твердого палива і мазуту (приблизно на 30%).

При розрахунку концентрації термічних оксидів нітрогену, що утворюються при спалюванні природного газу, у формулу (3.31) необхідно  $T_m$  підставити  $T'_m = 1,01T_m$  з метою обсягу підвищеної швидкості горіння палива.

При спалюванні природного газу зважаючи на відсутність паливного азоту можуть утворюватися тільки «швидкі» оксиди нітрогену у зв'язку з наявністю вуглеводневих з'єднань. Концентрація «швидких» оксидів нітрогену,  $\text{мг/м}^3$ , визначається при цьому за формулою:

$$NO_2^{шв} = 10^2 \left[ \frac{\alpha_{zop} + r}{1 + r} \right]^2 \left[ \frac{T'_m - 800}{1000} \right]^{0,33}, \quad (3.31)$$

$$\underline{r = 0,1}$$

$$T_m = 0,98 * 2416,813 * (1 - 0,43)^{0,25} * (1 - 0,1^{1+5*0,1}) * 1 = 1755,305\text{К}$$

де  $\beta_{cr} = 0,98$ ;  $\psi_{zc} = 0,43$ ;  $n = 5,0$ ;  $m_r = 1$ ;  $T'_a = 2416,813\text{К}$

$$\tau_0 = 0,024 * \exp\left(\frac{54290}{1755,305} - 23\right) = 66,64c$$

$$\tau_p = \frac{48,827}{2416,813 - 1333} * \left(\frac{0,134 * 23,88}{3000}\right)^{0,5} * 1,095 = 0,005c$$

$$\Delta T_p = \frac{(1755,305)^2 * 10^{-5}}{0,614 + 1755,305 * 10^{-5}} = 48,827K$$

$$T_r'' = 1403 - 0,1 * 7 * 10^2 = 1333K$$

$$\tau_{\text{проб}} = \frac{273 * 0,75}{0,325 * 1583,85 * 0,3 * 1,1 * (1 + 0,1)} = 1,095c$$

$$\bar{T}_r = 0,84 * \left[(1755,305)^4 + (1333)^4\right]^{0,25} = 1583,85K$$

$$NO_2^{mp} = 7,03 * 10^6 * 0,229 * \exp\left(-\frac{10860}{1755,305}\right) * \frac{0,005}{66,64} = 0,248 \frac{MГ}{M^3}$$

$$C_{O_2} = \frac{0,21 * 9,96 * [(1,07 - 1) + 0,1 * (1,13 - 1,07)] * 1,428}{[11,16 + (1,07 - 1) * 9,96] * (1 + 0,1)} = 0,017 \frac{KГ}{M^3}$$

$$NO_2^{ue} = 10^2 \left[\frac{1,07 + 0,1}{1 + 0,1}\right]^2 * \left[\frac{1772,85 - 800}{1000}\right]^{0,33} = 111,87 \frac{MГ}{M^3}$$

$$\text{де } T'_m = 1,01 * 1755,305 = 1772,85K$$

При спалюванні природного газу у зв'язку з відсутністю в ньому паливного азоту сумарна концентрація оксидів нітрогену складає

$$NO_2 = NO_2^{mp} + NO_2^{ue} \text{ MГ/M}^3. \quad (3.31)$$

$$NO_2 = 0,248 + 111,87 = 112,118 \frac{MГ}{M^3}$$

$$\underline{r = 0,15}$$

$$T_M = 0,98 * 2416,813 * (1 - 0,43)^{0,25} * (1 - 0,15^{1+5*0,15}) * 1 = 1546,934K$$

де  $\beta_{cr} = 0,98$ ;  $\psi_{3c} = 0,43$ ;  $n = 5,0$ ;  $m_r = 1$ ;  $T_a' = 2416,813K$

$$\tau_0 = 0,024 * \exp\left(\frac{54290}{1546,934} - 23\right) = 42,96c$$

$$\tau_p = \frac{38,044}{2416,813 - 1298} * \left(\frac{0,134 * 23,88}{3000}\right)^{0,5} * 1,15 = 0,004c$$

$$\Delta T_p = \frac{(1546,934)^2 * 10^{-5}}{0,614 + 1546,934 * 10^{-5}} = 38,044K$$

$$T_r'' = 1403 - 0,15 * 7 * 10^2 = 1298K$$

$$\tau_{преб} = \frac{273 * 0,75}{0,325 * 1436,88 * 0,3 * 1,1 * (1 + 0,15)} = 1,15c$$

$$\overline{T_r} = 0,84 * \left[ (1546,934)^4 + (1298)^4 \right]^{0,25} = 1436,38K$$

$$NO_2^{mp} = 7,03 * 10^6 * 0,017 * \exp\left(-\frac{10860}{1546,934}\right) * \frac{0,004}{42,96} = 9,94 * 10^{-5} \frac{MГ}{M^3}$$

$$C_{O_2} = \frac{0,21 * 9,96 * [(1,07 - 1) + 0,15 * (1,13 - 1,07)] * 1,428}{[11,16 + (1,07 - 1) * 9,96] * (1 + 0,15)} = 0,229 \frac{KГ}{M^3}$$

$$NO_2^6 = 10^2 \left[ \frac{1,07 + 0,15}{1 + 0,15} \right]^2 * \left[ \frac{1562,4 - 800}{1000} \right]^{0,33} = 102,825 \frac{MГ}{M^3}$$

де  $T_m' = 1,01 * 1546,934 = 1562,4K$

При спалюванні природного газу у зв'язку з відсутністю в ньому паливного азоту сумарна концентрація оксидів нітрогену складає:

$$NO_2 = NO_2^{mp} + NO_2^6 \text{ MГ/M}^3. \quad (3.32)$$

$$NO_2 = 9,94 * 10^{-5} + 102,825 = 102,825 \frac{MГ}{M^3}$$

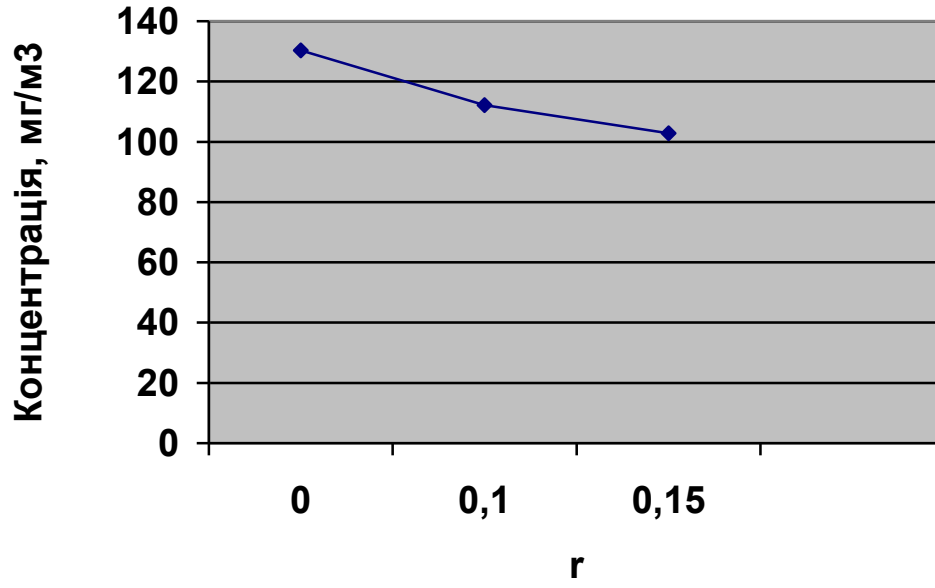


Рисунок 7 Графічна залежність  $C_{NO_2} = f(r)$

## ВИСНОВКИ

На сучасному етапі розвитку енергетики проблема її взаємодії з навколишнім середовищем є гострою, багатосторонньою проблемою, яка вимагає особливої уваги. Надзвичайно гостро ця проблема в енергетиці України.

Проблема захисту довкілля від шкідливих викидів енергетики, а також інших галузей промисловості за своїми масштабами є як національною, так і глобальною, оскільки поширення викидів не має меж.

В результаті виконання проекту виконано розрахунок концентрацій  $C_{NO_2}$  при номінальному навантаженні котла  $D_{ном.}$ , відсутності рециркуляції продуктів згорання в топку ( $r = 0$ ) і відсутності ступінчастого спалювання палива ( $\bar{B}_1 = 1,0$ ;  $\beta v = 0$ ). Оцінити, як зміниться концентрація  $NO_2$  при часткових навантаженнях, рівних:  $D = 0,6 * D_{ном.}$ ,  $D = 0,8 * D_{ном.}$  і представити графічну залежність  $C_{NO_2} = f(D)$ .

- 1.
- 2.
3. Здійснено.
4. Отримані результати досліджень вказують на те, що
5. Проведено інформаційно-просвітницьку роботу серед населення (анкетування, проведення еколекторію; розповсюдження «Пам'яток здоров'я серед місцевих жителів» тощо. Сподіваємось, що дані нашого дослідження не будуть викликати відчай, а вкажуть шлях до збереження здоров'я, так як мешканці селища зможуть обирати для використання ґрунти, які відповідають санітарним нормам.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций: Учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
2. Рабинович О.М. Котельные агрегаты. – М. – Л.: Машгиз, 1963. – 460 с.
3. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 527 с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Теория горения и топочные устройства: учеб. Пособие для студентов высш. учебных заведений / под. ред. Д.М. Хзмаляна – М.: Энергия, 1976.
6. Бузников Е.Ф. Производственные и отопительные котельные / Е.Ф. Бузников – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Парогенераторы / под ред. А.П. Ковалева, - М.; Л.: Энергия, 1988.
8. Д.Дэвинс. Энергия: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Теплотехника: учеб. для вузов / под. ред. А.П. Баскакова – М.: Энергоатомиздат, 1991 г.
10. Александров В. П. Паровые котлы малой и средней мощности / В. П. Александров – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1972.- 200с.
11. Вороновський Г.К. Сучасна теплова електрична станція – Харків: ХДАМГ, 1997. – 152с.
12. Енергетичні установки і навколишнє середовище. За ред.. проф. Малярєнка В.А. Навчальний посібник. – Харків: ХДАМГ, 2002. - 398с.
13. Тепловые электрические станции и атомные электрические станции: текст лекции / В.И. Касилов, О.В. Касилов, Л.И. Тютюник, Л.А. Иванова. – Харьков: «Типография Мадрид», 2017. – 104с.

## Технічні характеристики котла 4 КВ-ГМ-100 (Дорогобужкотломаш)

Водонагрівальний стаціонарний котел теплопродуктивністю 116,3 (100) МВт (Гкал/г), призначений для отримання гарячої води тиском до 2,25 (22,5) МПа (кгс/см<sup>3</sup>) і номінальною температурою 150 °С, що використовується в системах опалювання, вентиляції і гарячого водопостачання промислового і побутового призначення, а також для технологічних цілей.

- 1) теплопродуктивність Гкал/г = 100  
МВт = 116,3
- 2) вид палива газ/мазут
- 3) робочий тиск води МПа = 2,25  
кгс/м<sup>2</sup> = 10÷25
- 4) температура води на вході, °С:  
основний режим = 70  
тепловий режим = 110
- 5) температура води на виході, °С = 150
- 6) гідравлічний опір, МПа не більше 0,35
- 7) гідравлічний опір, кгс/см<sup>2</sup>:  
основний режим = 1,65  
піковий режим = 0,79
- 8) діапазон регулювання теплопродуктивності по відношенню до номінальної % = 20÷100
- 9) маса котла розрахункова, кг = 173200
- 10) маса трубної системи, кг = 93100
- 11) витрата води, м/г:  
основний режим = 1235  
тепловий режим = 2460
- 12) витрата палива:  
газ, м<sup>3</sup>/г = 12520  
мазут, кг/г = 11500
- 13) середнє напрацювання на відмову не менше 5000
- 14) середній термін служби до списання не менше 20  
або 100000 годин
- 15) ККД котла % не менше  
газ = 93,2

- мазут = 91,5
- 16) питомий викид  $\text{NO}_x$ , мг/м<sup>3</sup> = 300
  - 17) питомий викид  $\text{CO}$ , мг/м<sup>3</sup> = 380
  - 18) еквівалентний рівень шуму в зоні обслуговування, ДБа не більше 80
  - 19) температура зовнішньої (ізольованої) поверхні нагріву казана, °C = 55
  - 20) об'єм топкової камери, м<sup>3</sup> = 388
  - 21) променесприймаюча поверхня, м<sup>2</sup> = 325
  - 22) теплонавантаження топкового об'єму,  $q_v$ , Ккал/(м<sup>3</sup>Г) =  $280 \cdot 10^3$
  - 23) теплове навантаження променесприймаюча поверхні, Ккал/(м<sup>3</sup>Г)  
 $q_f$  газ =  $116 \cdot 10^3$   
 $q_f$  мазут =  $137 \cdot 10^3$
  - 24) поверхня нагріву конвективних пучків, м<sup>2</sup> = 2385
  - 25) температура газів, що йдуть, °C  
 газ = 140  
 мазут = 180
  - 26) опір газового тракту котла мм. вод. ст. = 120
  - 27) опір повітряного короба з пальниками, мм. вод. ст.
  - 28) глибина топки, мм = 6240
  - 29) глибина конвективної шахти, мм = 3168
  - 30) довжина котла  $L_3$ , мм = 9558
  - 31) довжина котла (включаючи майданчики), мм = 14160



Додаткові початкові дані для розрахунку:

1. Паливо – природний газ газопроводу Шебелинка-Харків.

2. Теплота згорання нижча сухого газу -  $Q_H^C = 8910 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3} = 37332,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$

3. Теоретичний об'єм повітря -  $V_B^0 = 9,96 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

4. Теоретичний об'єм продуктів згорання  $V_r^0 = 11,16 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

5. Теплова напруга топкового об'єму  $q_v = 0,325 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$

6. Теплова напруга перетину топкової камери  $q_F = 0,134 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$

7.  $a_T = 5700 \text{мм}$

8.  $b_T = 6240 \text{мм}$

9.  $t_{r.b.} = 342^\circ \text{C}$

10. Коефіцієнт надлишку повітря в топці  $\alpha_T = 1,1$

11. Присос повітря в топку  $\Delta\alpha_T = 3 * 0,02 = 0,06$

12. Абсолютна температура газів на виході з топки  $T_r'' = 1403 \text{К}$

13. Коефіцієнт теплової ефективності екранів в зоні ядра факела  $\psi_{з.г.} = 0,43$

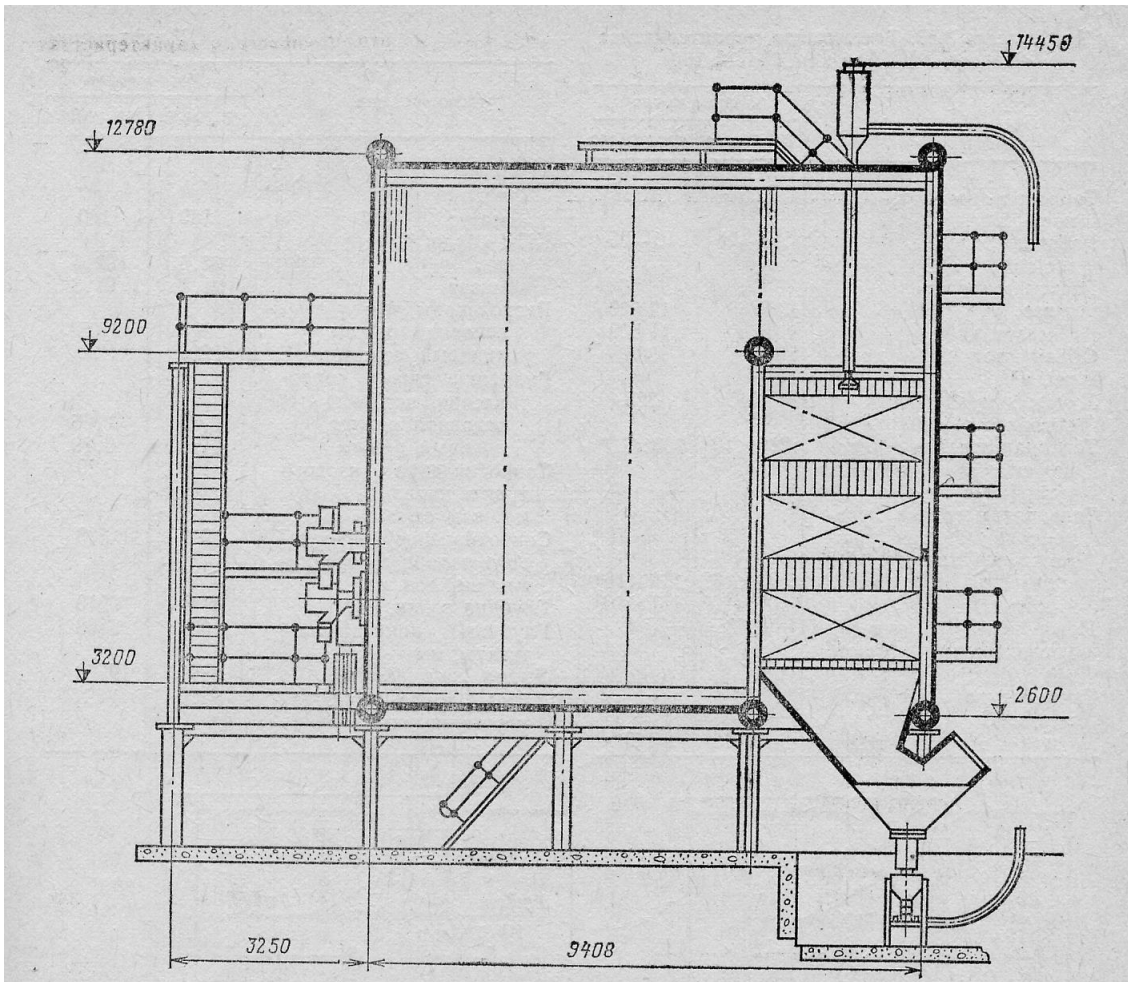
14. Коефіцієнт надлишку повітря в газах рециркуляції  $\alpha_{pc} = 1,13$

15. Частка палива, що поступає в першу зону горіння  $\overline{B}_1 = 0,87$

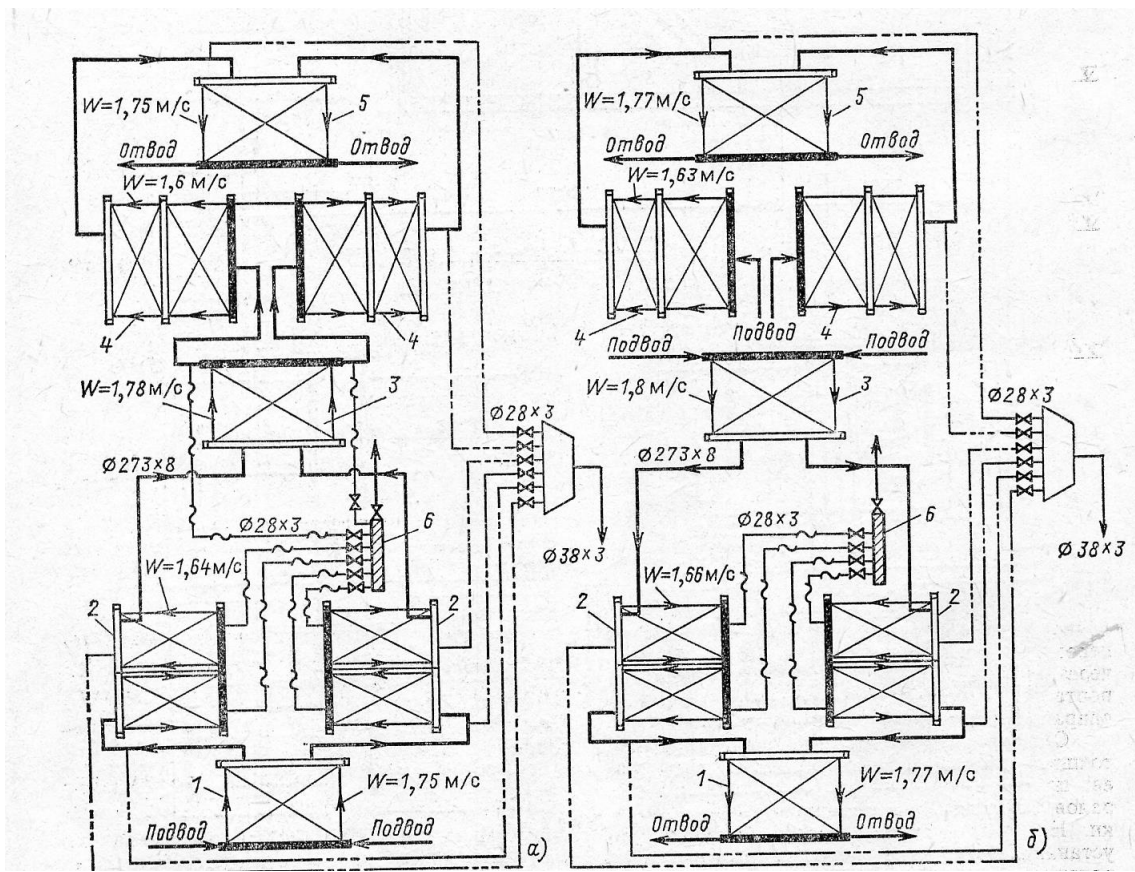
16. Місце установки, тип і кількість пальників: 3 газомазутні пальники РГМГ-30 в два яруси, розташовані на фронтальній стінці.

17. Коефіцієнт заповнення перетину топки висхідним потоком газу, при однофронтальному розташуванні пальників  $\xi = 0,75$

18. Питомий приведений об'єм газів для природного газу  $\vartheta_r^n = 0,3 \frac{\text{м}^3}{\text{МДж}}$



**Рисунок 4 – Водогрійний котел КВ-ГМ-100**



**Рисунок 5 - Схема руху води в котлі KB-ГМ-100**

а – основний режим;

би – піковий режим;

1 – фронтний екран;

2 – бічні екрани;

3 – проміжний екран;

4 – конвективна частина і бічні крани;

5 – задній екран конвективної шахти;

6 – колектор дренажу;

8 - нижні колектори;

- - лінія води;
- - лінія повітря;
- ~ - лінія дренажу.