

С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК [621.18+504.3]
ББК [31.361+26.23]я73
Т23

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 27.11.2014 р.)

Рецензенти:

М. В. Губинський, доктор технічних наук, професор

А. П. Ранський, доктор хімічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

Ткаченко, С. Й.

Т23 Екологічні аспекти виробництва енергії / С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 83 с.

Розглянуті основні питання утворення шкідливих продуктів згорання при спалюванні органічних палив в котельних установках. Викладені традиційні і перспективні методи обмеження шкідливих викидів ТЕС і котелень в навколишнє середовище в процесах паливopідготовки, спалювання палива і охолодження продуктів згорання. Наведені методики розрахунку шкідливих речовин в атмосферу з димовими газами.

УДК [621.18+504.3]
ББК [31.361+26.23]я73

Зміст

ПЕРЕДМОВА.....	5
1 ШКІДЛИВІ РЕЧОВИНИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	6
1.1 Оксиди вуглецю CO_x	7
1.2 Оксиди сірки SO_x	7
1.3 Оксиди азоту NO_x	8
1.4 Поліциклічні ароматичні вуглеводні	9
1.5 Зола твердого палива	10
1.6 Мазутна зола.....	10
2 ВПЛИВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	11
2.1 Газові та аерозольні забруднювальні викиди та їхній шкідливий вплив	11
2.1.1 Погіршення прозорості атмосфери і фотохімічний смог	11
2.1.2 Утворення опадів і кислотних дощів	12
2.1.3 Руйнування озонового шару	14
2.2 Тепловий вплив об'єктів енергетики на навколишнє середовище	14
2.3 Шумовий вплив об'єктів енергетики на навколишнє середовище	16
3 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З ВІДХІДНИМИ ГАЗАМИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК	17
3.1 Одиниці фізичних величин, що характеризують газоподібні компоненти продуктів згорання.....	17
3.2 Класифікація шкідливих речовин	21
3.3 Гранично допустима концентрація	21
3.4 Методи визначення кількості шкідливих викидів з продуктами згорання	23
3.4.1 Розрахунок утворення оксидів сірки і температури точки роси продуктів згорання під час спалювання мазуту і твердих палив	23
3.4.2 Розрахунок викидів твердих частинок	24
3.4.3 Визначення викидів мазутної золи.....	24
3.4.4 Визначення викидів монооксиду вуглецю (CO).....	26
3.4.5 Визначення викидів бензопірену.....	26
3.4.6 Визначення викидів оксидів азоту NO_x	28
3.4.7 Визначення викидів парникових газів	34
3.5 Перерахунок вмісту забруднювальних речовин у відхідних газах на об'ємний вміст кисню 6% і приведення до нормальних умов	36
3.5.1 Визначення концентрації забруднювальної речовини в масових одинацях при відборі газів на аналіз з осушуванням	36
3.5.2 Визначення концентрації забруднювальної речовини в масових одинацях при відборі газів на аналіз без осушування	37
3.5.3 Визначення концентрації забруднювальної речовини в об'ємних одинацях при відборі газів на аналіз з осушуванням.....	37

3.5.4 Визначення концентрації забруднювальної речовини в об'ємних одиницях при відборі газів на аналіз без осушування	37
3.6 Приклади розв'язання задач.....	38
3.7 Завдання для самостійної роботи	52
4 МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ З ВІДХІДНИМИ ГАЗАМИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК	57
4.1 Очищення продуктів горіння від газоподібних токсичних викидів.....	57
4.2 Методи зниження утворення оксидів азоту.....	58
4.2.1 Відновлення оксидів азоту продуктів горіння палива	59
4.3 Методи стримування утворення оксиду вуглецю	60
4.4 Очищення продуктів горіння від механічних домішок	60
4.5 Методи стримування утворення оксидів сірки.....	62
5 ШКІДЛИВІ ВИКИДИ ВІД ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ТА МЕТОДИ ЇХНЬОГО ВИЗНАЧЕННЯ	64
5.1 Шкідливі викиди від газотурбінних установок	64
5.1.1 Газоподібні продукти згорання палива і заходи щодо їхнього зменшення	65
5.2 Теплові викиди ГТУ та методи їхнього зменшення.....	65
5.3 Шум ГТУ і міри щодо його зменшення.....	66
5.4 Розрахунок викидів оксидів азоту від газотурбінних установок.....	66
6 ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ТЕС.....	72
6.1 Екологічна ефективність реконструкції електростанцій на основі технології циркулювального киплячого шару	72
6.2 Екологічна ефективність парогазових установок із внутрішньоцикловою газу фікацією твердого палива	73
6.3 Екологічна ефективність низькотемпературної вихрової (НТВ) технології спалювання твердого палива	76
ГЛОСАРІЙ	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	78
ДОДАТКИ	79

ПЕРЕДМОВА

Запропонований навчальний посібник призначений для студентів заочної та денної форми навчання напряму підготовки теплоенергетика. Він підготовлений відповідно до навчальної програми дисципліни "Екологічні аспекти виробництва енергії". В рамках годин, відведених за навчальним планом (16 год лекцій, 16 год практичних занять, 22 год самостійної роботи студентів), автори намагались в стислому вигляді викласти основний лекційний матеріал і ознайомити студентів з екологічними наслідками виробництва енергії та методами визначення шкідливих речовин енергетичних установок.

Автори виходили з того, що в процесі навчання важливо отримати навички інженерних розрахунків викидів забруднювальних речовин від котельних установок, ТЕС та ін. Зважаючи на це, в посібнику наведено приклади розрахунків очікуваних викидів оксидів азоту, сірки, вуглекислого газу, твердих частинок. Приділено увагу обробці даних інструментального аналізу димових газів. Безумовно, наведені приклади розрахунків не вичерпують всю їхню багатоваріантність, але висвітлюють основні принципи та інженерні підходи. Викладений в посібнику матеріал буде корисним в подальших процесах курсового та дипломного проектування.

В посібнику подано необхідний додатковий матеріал, що спрощує роботу з великою кількістю літературних та довідкових джерел. Він містить набір задач та питань для виконання контрольних робіт студентами заочної форми навчання або виконання самостійної роботи студентами стаціонарного відділення.

Автори вдячні рецензентам за корисні поради і зауваження в процесі підготовки рукопису посібника.

Автори

1 ШКІДЛИВІ РЕЧОВИНИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

У всьому світі понад 80% теплової енергії одержують, спалюючи викопне органічне паливо і перетворюючи його хімічну енергію на електричну і теплову. Близько 80% усіх видів забруднень біосфери зумовлене саме енергетичними процесами [1].

Атмосферне повітря є життєво важливим компонентом навколишнього середовища. Органічні палива, що використовуються в котельнях для отримання теплової і електричної енергії в своєму складі мають вуглець, сірку, азот. Під час спалювання палив в топках котлів чи камерах згорання газотурбінних установок (ГТУ) утворюються продукти згорання, такі як оксиди вуглецю CO_x , водяні пари H_2O , оксиди сірки SO_x , оксиди азоту NO_x , поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), сполуки ванадію, тверді частинки. Потім викидаються в атмосферу і розсіюються в ній за допомогою димових труб. При цьому відбувається забруднення атмосферного повітря.

Під час **спалювання вугілля** в атмосферу виділяються зола із частинками неспаленого палива, сірчистий і сірчаний ангідриди SO_2 і SO_3 , оксиди азоту NO_2 і NO_3 , деяка кількість фтористих сполук та гідрокарбонати, а також газоподібні продукти неповного згорання. Летка зола іноді містить, крім нетоксичних складових, шкідливі домішки. Так, в золі донецьких антрацитів у незначній кількості міститься арсен, а в золі екібастузького вугілля і деяких інших родовищ – вільний діоксид кремнію, у золі сланців – вільний діоксид кальцію.

У процесі **спалювання мазуту** в атмосферне повітря з димом і газами надходять: сірчистий і сірчаний ангідриди SO_2 і SO_3 , оксиди азоту (NO і NO_2), газоподібні і тверді продукти неповного згорання палива, сполуки ванадію, солей натрію, а також речовини, які видаляють з поверхні котлів під час їхнього очищення.

Природний газ в екологічному плані є найчистішим видом палива. Проте і під час добре організованого спалювання природного газу утворюються шкідливі речовини: діоксид вуглецю CO_2 , оксиди азоту, у незначних кількостях оксиди сірки SO .

Шкідлива (забруднювальна) речовина – це хімічна або біологічна речовина або суміш таких речовин, що містяться в атмосферному повітрі, які в певних концентраціях наносять шкідливий вплив на здоров'я людини і навколишнє природне середовище.

В атмосферному повітрі відбувається подальше перетворення газоподібних викидів ТЕС, яке триває від декількох годин до декількох місяців. Маючи високу токсичність, вони наносять значної шкоди довкіллю та здоров'ю людей. Наявність шкідливих продуктів згорання органічних палив в атмосфері призводить до руйнування озонового шару, утворення фотохі-

мічних туманів (смогів), корозії металокопструкцій, ерозії ґрунту, знищення флори; викликає різні (у тому числі і ракові) захворювання у людини. Потрібно відзначити, що ступінь впливу шкідливих викидів на навколишнє середовище істотно підвищується через концентрацію джерел викидів у великих промислових регіонах.

Нижче розглянуті найбільш поширені шкідливі продукти згорання органічних палив.

1.1 Оксиди вуглецю CO_x

Оксиди вуглецю $CO_x = CO_2 + CO$ входять до складу атмосфери, беруть участь в глобальних циклах перетворення (кругообігу) вуглецю в біосфері [2].

Оксид вуглецю (або чадний газ) CO є безбарвним, позбавленим смаку газом, що має токсичну дію. Потрапляючи в організм, CO реагує з гемоглобіном крові, перешкоджаючи нормальному перенесенню кисню, в результаті чого можливе отруєння.

Об'ємна концентрація CO в повітрі невелика і становить всього близько $0,13 \cdot 10^{-4}\%$. Проте вплив CO на міське населення стає досить важливою проблемою для великих промислових регіонів.

CO утворюється в топках котлів внаслідок локальних недочот повітря або несприятливих теплових і аеродинамічних умов.

Вуглекислий газ (або діоксид вуглецю) CO_2 є нетоксичним газом без кольору і запаху. Об'ємна частка вуглекислого газу CO_2 в атмосфері в даний час становить $0,03-0,032\%$, однак є тенденція до його збільшення на $(0,6-0,7) \cdot 10^{-4}\%$ на рік в результаті активної промислової діяльності людини.

Вуглекислий газ пропускає короткохвильове світлове випромінювання Сонця, але ефективно поглинає довгохвильове випромінювання, відбите від поверхні Землі. Тому вуглекислий газ, що знаходиться в атмосфері, діє як захисний екран, зменшуючи теплові втрати планети. "Парниковий" ефект, пов'язаний з наявністю CO_2 , важливий фактор, що впливає на температуру земної кулі. Так, за даними дослідників, збільшення об'ємної частки CO_2 в атмосфері до $0,06\%$ призведе до підвищення середньорічної температури на землі на $3-4$ °C. Це викличе танення льодовиків і морського льоду і, як наслідок, затоплення приблизно четвертої частини суші. Отже, діоксид вуглецю, що надходить з антропогенних джерел, в глобальному масштабі потрібно розглядати як забруднювач.

1.2 Оксиди сірки SO_x

Сірка, що міститься в паливі, є джерелом утворення оксидів сірки SO_x : сірчистого SO_2 і сірчаного SO_3 ангідридів. Сумарний масовий викид SO_x залежить лише від вмісту сірки в паливі S^p . Сірка в твердих паливах може

міститись в трьох видах: органічна S_{op} , колчеданна S_k , сульфатна S_c . Органічна сірка входить в склад складних високомолекулярних органічних сполук палива. Колчеданна сірка – це її сполуки з металами (залізний колчедан FeS_2), вона входить до складу мінеральної частини палива. Сульфатна сірка знаходиться в мінеральній частині палива у вигляді сульфатів лужних металів ($CaSO_4$ та $MgSO_4$) і тому в процесі горіння не окислюється, а переходить в золу. До складу газоподібних палив сірка входить лише у вигляді сірководню H_2S або SO_2 . Сірка в мазуті, в основному, знаходиться в складі сіркоорганічних сполук і меншою мірою у вигляді H_2S та сірки елементарної.

Сірчистий ангідрид SO_2 є безбарвним газом з гострим запахом, при вдиханні подразнює дихальні шляхи, порушує обмінні і ферментні процеси. При масовій концентрації SO_2 в атмосферному повітрі $0,08 \text{ мг/м}^3$ люди відчують дискомфорт. Найбільш чутливі до SO_2 хвойні дерева, у яких спостерігається процес в'янення при масовій концентрації SO_2 в повітрі понад $0,08 \text{ мг/м}^3$. Наявність сірчистого ангідриду спільно з димом і сажою в атмосферному повітрі (при високій вологості останнього) є причиною утворення в промислових центрах фотохімічних туманів (смогів) у ранкові години. Тривалість перебування SO_2 в атмосфері порівняно невелика (від 2–4 до 15–20 діб). За цей час відбувається його повне окислення до SO_3 , яке протікає значно швидше під дією сонячного світла (у формулі відображено квантом світла):



Сірчаний ангідрид (або триоксид сірки) SO_3 є безбарвним газом, який подразнює дихальні шляхи. У вологому повітрі він утворює туман (аерозоль) сірчаної кислоти, яка активно руйнує конструкції, будівлі та обладнання [2].

1.3 Оксиди азоту NO_x

Під час спалювання органічних палив азот, що міститься у повітрі і паливі, стає реакційноздатним і, з'єднуючись з киснем, утворює оксиди.

Оксиди азоту $NO_x = NO + NO_2 + N_2O$ є основними забруднювачами атмосфери під час спалювання енергетичних палив.

Оксид азоту NO є безбарвним газом. Це отрута, що негативно впливає на кров і нервову систему.

Діоксид азоту NO_2 – газ бурого-червоного кольору, він подразнює і "припікає" дихальні шляхи, призводить до набряку легенів.

Геміоксид азоту N_2O – безбарвний газ, що використовується в медицині як легкий наркоз. Він практично відсутній в продуктах згорання за

котлами. Його роль в процесі трансформації оксидів азоту в зоні горіння нині не достатньо вивчена [2].

Існує два принципово різних джерела утворення оксиду азоту NO: окислення атмосферного азоту N_2 повітря, що використовується як окислювач під час горіння, і окислення азотомістких складових палива. В першому випадку утворюються термічні і "швидкі оксиди азоту", в другому – паливні – NO.

В топках парових котлів при горінні палива утворюються оксиди азоту двох типів – оксид NO і діоксид NO_2 . Доокислення NO до NO_2 відбувається в атмосфері в процесі розповсюдження димового факела вільним киснем (озоном) повітря. Тому масовий викид оксидів азоту з котлів розраховується за NO_2 . В газових викидах ТЕС їхня концентрація становить 0,2–1,2 г/м³ [3].

Оксиди азоту утворюються при згоранні палива в ядрі факела трьома можливими шляхами:

паливні – утворюються за температури газового середовища – 800–2100 К за рахунок азоту, що входить до складу палива N^p ;

термічні – утворюються за високих температур факела (більше 1600 К) за рахунок окислення азоту повітря;

швидкі – утворюються при контакті проміжних вуглеводневих сполук палива (під час спалювання газу і мазуту) в початковій зоні горіння факела за температури вище 1000 К [3].

1.4 Поліциклічні ароматичні вуглеводні

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) зустрічаються в продуктах згорання вуглеводневих палив. Найбільш поширені бензопірен, пірен, антрацен, перилен. ПАВ мають високу канцерогенну і мутагенну активність, вони активізують фотохімічні смоги в містах. Молекули ПАВ містять цикли із шести атомів вуглецю з трьома подвійними зв'язками (бензоліні ядра). Вони утворюються в результаті неповного згорання будь-яких вуглеводневих палив. Причиною цього може бути стримування реакцій окислення вуглеводнів палива холодними стінками топкових пристроїв, а також через неякісне змішування палива і повітря. Безпосереднє утворення ПАВ відбувається під час реакцій піролізу і синтезу в процесі горіння палива. Механізм їхнього утворення – складний багатостадійний процес, який ще недостатньо вивчений [2].

Бензопірен $C_{20}H_{12}$ – тверда кристалічна речовина жовтого кольору з температурою плавлення 179 °С і кипіння 500–570 °С. Тому в газовому тракті котлів $C_{20}H_{12}$ залежно від температури може знаходитись в газоподібному, рідкому (аерозоль) чи твердому станах. Міра уловлювання $C_{20}H_{12}$ в електрофільтрах і комбінованих золовловлювачах знаходиться в діапазоні 60–80%.

В атмосферному повітрі під дією ультрафіолетового випромінювання відбувається руйнування структури бензопірену, однак порівняно з іншими канцерогенними вуглеводнями він найбільш стійкий. Бензопірен – одна з найбільш небезпечних канцерогенних речовин, що викликає ракові захворювання [2].

1.5 Зола твердого палива

Основна частина мінеральної складової палива переходить в процесі спалювання в летку золу, що виноситься димовими газами. Зола твердого палива може складатись з оксидів кремнію, алюмінію, титану, калію, натрію, заліза, кальцію і магнію. Кальцій в золі може знаходитись у вигляді вільного оксиду, а також в складі силікатів, сульфатів та інших сполук. Залежно від вмісту оксиду кальцію в золі твердого палива змінюється її токсичність. Фізико-хімічні властивості золи визначають ефективність роботи газоочисних пристроїв. В разі підвищеного вмісту оксидів кальцію в золі стає неможливою робота мокрих золовловлювачів через цементацію золи. А для інерційних золовловлювачів суттєве значення має властивість золи злипатись.

Зола (кіптява) має складну вуглеводневу структуру, більш ніж на 90% вона складається з вуглецевих атомів. В золі палив в малих дозах можуть бути свинець, ртуть. При повільному розкладанні зола виділяє бензопірен. При попаданні в організм частинки золи можуть викликати злоякісні пухлини [2].

1.6 Мазутна зола

Під час спалювання мазуту утворюється мазутна зола, що є складною сумішшю. До складу мазутної золи входять оксиди ванадію (VO , VO_2 , V_2O_5), а також оксиди металів (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Найбільш токсичною сполукою є V_2O_5 , за концентрацією якого в золі встановлені нормативи ГДК.

Пентаоксид ванадію V_2O_5 – червоно-жовтий порошок, отрута з різноманітним впливом на організм: викликає зміни в кровообігу, в органах дихання, в нервовій системі, в обміні речовин, а також алергічне запалення шкіри [2].

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте шкідливі викиди під час спалювання органічних видів палив.
2. Наведіть приклади поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Назвіть причини їхнього утворення.
3. Що таке зола? Які хімічні сполуки входять до складу золи?
4. Що таке паливні оксиди азоту? Що таке термічні оксиди азоту?
5. Що таке вуглекислий газ? Чому CO_2 називають парниковим газом?

2 ВПЛИВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Традиційні способи виробництва теплової й електричної енергії в котельнях і ТЕС пов'язані з негативним локальним і глобальним впливом на навколишнє середовище, зумовленим: викидом в атмосферу таких шкідливих речовин, як оксиди сірки та азоту, монооксиди вуглецю, тверді частинки золи, канцерогенні органічні речовини, зокрема бензопірен та ін.; викидом величезних кількостей діоксиду вуглецю, що є основним чинником виникнення "парникового ефекту"; тепловим забрудненням навколишнього середовища; скиданням мінералізованих і нагрітих вод; споживанням у великих об'ємах кисню і води; забрудненням ландшафту; виникненням електромагнітних та електростатичних полів.

2.1 Газові та аерозольні забруднювальні викиди та їхній шкідливий вплив

До забруднювальних газових і аерозольних викидів об'єктів енергетики належать викиди різного характеру, які порушують рівновагу природного середовища в локальних (місцевих), регіональних і глобальних масштабах, а також умови проживання живих організмів.

Під час спалювання рідкого і твердого палива відбуваються викиди у вигляді твердих частинок, які, потрапляючи в атмосферу, утворюють так звані *аерозолі*. Аерозолі можуть бути нетоксичними (зола) і токсичними, наприклад частинки вуглецю, на поверхні яких може адсорбуватися бензопірен ($C_{20}H_{12}$) – сильнодіюча канцерогенна сполука.

Усі триатомні гази (H_2O , NO_2 , SO_2 і особливо CO_2) належать до "парникових газів", тому що вони характеризуються селективною поглинальною спроможністю в інфрачервоній області теплового випромінювання і сприяють утворенню *парникового ефекту*.

Сукупний вплив газових і аерозольних викидів енергетичних об'єктів може призвести до появи різних шкідливих екологічних ефектів, зокрема кризових ситуацій у біосфері. До останніх належать: погіршення прозорості атмосфери (локальний і регіональний характер), утворення опадів і кислотних дощів (локальний і регіональний характер), парниковий ефект (регіональний і глобальний характер).

2.1.1 Погіршення прозорості атмосфери і фотохімічний смог

Прозорість атмосфери, установлену візуальними спостереженнями, у метеорології визначають параметром, що називають "дальністю бачення". *Дальність бачення* є максимальною відстанню у заданому напрямку, на

якому неозброєним оком у денний час ще можна побачити і розрізнити рельєфний темний предмет, який знаходиться над лінією горизонту.

Наявність в атмосфері звичайних для промислових міст аерозолей, діоксидів вуглецю, сірки і азоту в сполученні з підвищеною вологістю зменшує дальність бачення, що знижує на 20–50% кількість сонячних днів (порівняно із сільськогосподарськими районами), зменшує інтенсивність ультрафіолетового випромінювання. Усе це порушує рух і спричиняє аварії автомобільного, морського і повітряного транспорту, знижує врожайність сільськогосподарських культур і змінює мікроклімат.

Основні забруднювачі, які впливають на прозорість атмосфери: викиди, що містять пил, дим, сажу та інші тверді частинки, які позначаються як загальна кількість аерозолу (ЗКА); SO_2 та інші газоподібні сполуки сірки, які з високою швидкістю реагують в атмосфері, створюючи сполуки сульфату і сірчаної кислоти, що знаходяться у вигляді аерозолу; NO і NO_2 , які реагують, утворюючи нітрат і HNO_3 у вигляді частинок, які входять до складу аерозолу (за певних умов червоно-бурий колір NO_2 може стати причиною зміни кольору димових викидів і появи бурої димки в міських районах); фотохімічне забруднення повітря, пов'язане з утворенням у результаті фотохімічних реакцій шкідливих аерозолей з частинками субмікрометрових розмірів.

Діоксид азоту NO_2 за наявності в атмосфері вуглеводів C_xH_y у визначених погодних умовах може стати джерелом ще однієї кризової екологічної ситуації, яку називають "смогом". Природа цього явища полягає в тому, що від ультрафіолетового опромінення діоксиду азоту в атмосфері перебігають хімічні реакції з утворенням оксиду азоту NO і озону O_3 . Надлишковий уміст у повітрі оксиду азоту може ініціювати процес розкладання озону. За наявності в атмосфері вуглеводнів C_xH_y відбувається їх окиснення з утворенням альдегідів, нітратів тощо. Окис азоту перетворюється на двоокис, з'являється озон, а також пероксиацетилнітрат (PAN). З'єднуючись, O_3 , NO_2 і PAN утворюють фотохімічні оксиданти, які є однією з причин фотохімічного смогу. Сполуки, які утворюються при цьому, токсично діють на людину, призводячи до порушення серцево-судинної діяльності, отруєння дихальних шляхів та інших захворювань організму.

2.1.2 Утворення опадів і кислотних дощів

Ці процеси також пов'язані з наявністю в атмосфері аерозолів і оксидів SO_2 та NO_2 . Кліматичний цикл випадання опадів має життєво важливе значення для всього людства. Великомасштабні впливи на процеси утворення опадів можуть зумовити дуже серйозні наслідки. Проявом таких впливів є кислотні дощі, які мають низькі значення рН. Зміна значення рН опадів може викликати багато проблем, пов'язаних з біосферою.

У нижніх шарах атмосфери постійно наявні водяні пари і гігроскопічні солі (наприклад, морська сіль). Частинки гігроскопічних солей виконують

роль ядер конденсації (ЯК). У процесі насичення вологою ЯК набухають і змінюють свої розміри від декількох мікрометрів до декількох міліметрів.

У теплих хмарах є тільки ЯК, їхня концентрація може досягати від 1 до 100 ЯК/см³. У холодних хмарах крім ЯК можуть бути і ядра замерзання (ЯЗ), концентрація яких досить мала – до 10–3 ЯЗ/см³. Тому механізм утворення опадів у теплих і холодних хмарах різний.

У теплих хмарах визначальним є процес осідання великих ЯК та їхнього зіткнення з дрібними ЯК (коагуляція). При цьому зменшується концентрація ЯК і збільшується їхній діаметр, а також можливий поділ великих ЯК на дрібні під аеродинамічним впливом (наприклад, за рахунок турбулентності) і повернення системи в початковий стан або випадання ЯК з хмари у вигляді дощових крапель. Механізм утворення опадів у холодній хмарі пояснюється дією ефекту переохолодження ЯК (температура переохолодження може досягати мінус 40 °С) і наявності градієнта тиску пари води поблизу поверхні частинок ЯК і ЯЗ. У зв'язку з вищим парціальним тиском пари води у поверхні ЯК відбувається дифузійне перенесення вологи до поверхні ЯЗ. При цьому зростає розмір ЯЗ і можливе їхнє перетворення на снігові пластівці, які, випадаючи, можуть утворювати дощ (проходячи через теплі шари атмосфери), град чи снігопад.

Викиди енергетичних об'єктів у вигляді SO₂ або NO₂ не змінюють природний механізм утворення опадів, але змінюють умови утворення ЯК і ЯЗ. Це пов'язано з тим, що, потрапляючи в атмосферу, оксиди сірки й азоту утворюють відповідні кислоти і солі. Солі сірчистої (сульфіди) й азотної (нітрати) кислот, які характеризуються високою гігроскопічністю, є додатковим джерелом генерування ЯК і ядер вимивання, що може бути причиною порушення природного циклу утворення опадів. Атмосферні забруднення впливають на процеси, які відбуваються в теплій хмарі, таким чином. По-перше, додаткове введення дрібних гігроскопічних частинок у хмару може збільшити концентрацію ЯК, інтенсифікуючи утворення крапель у хмарі й водночас зменшуючи їхній розмір. Збільшення кількості маленьких крапель переважно знижує ефективність процесу утворення опадів. По-друге, атмосферні забруднення можуть збільшити кількість великих ЯК. Завдяки цьому відбувається більш ефективний механізм утворення опадів за рахунок зіткнення. Отже, атмосферні забруднення можуть як прискорювати, так і уповільнювати утворення опадів.

Атмосферні забруднення можуть впливати на процес утворення опадів у холодних хмарах так само, як і в теплих хмарах, тобто підвищувати концентрацію ЯЗ.

Газові викиди, які містять сірку, можуть призвести до нагромадження в опадах як газоподібного SO₂, так і сульфатів або сірчаної кислоти у вигляді аерозолі. У результаті кислотність опадів значно зростає.

Оксиди азоту, зокрема NO і NO₂, в атмосфері окиснюються в нітрати і HNO₃, у результаті нагромадження яких в осадах також зменшується рН. Уперше з проблемою випадання опадів з низьким рН зіткнулися в Сканди-

навії наприкінці 60-х років ХХ ст. Спричинило це явище, яке на-звали "кислотний дощ", значне збільшення викидів забруднень, що містять сірку, в інших частинах Європи, хоча певну роль відіграли і місцеві викиди. У багатьох районах підвищена кислотність опадів значно не впливає на властивості ґрунтів і води, тому що значна буферна спроможність ґрунту дозволяє компенсувати зміни рН опадів. Однак малопотужні льодовикові ґрунти, характерні, наприклад, для Нової Англії і Скандинавії, не мають достатню буферну спроможність. Тоді опади з низьким значенням рН можуть змінити ґрунт, що, у свою чергу, може змінити рН і хімічний склад води у водоймах. Хімічні зміни в ґрунті й у воді – потенційні джерела можливих змін у біосфері.

2.1.3 Руйнування озонового шару

Озон O_3 , який міститься в атмосфері, крім токсичного впливу (у підвищених його концентраціях) на живі організми, зокрема й на людину, виконує і помітну захисну функцію. Нагромаджуючись у верхніх шарах атмосфери, він утворює озоновий шар, який захищає поверхню Землі від космічного випромінювання. Зменшення товщини озонового шару і подальше його зникнення призводить до утворення так званих "озонових дір" в атмосфері, у результаті чого різко збільшується інтенсивність космічного випромінювання, що потрапляє на поверхню Землі. Природу появи і зникнення озонових дір в атмосфері ще недостатньо вивчено. Один з можливих механізмів руйнування озонового шару може визначатися його високою хімічною активністю і, насамперед, можливістю хімічної реакції озону O_3 з монооксидом азоту NO з утворенням діоксиду азоту NO_2 і кисню O_2 .

Зменшення озонового шару та збільшення космічного випромінювання може спричинити незворотні негативні наслідки у вигляді мутації і переродження живих організмів: канцерогенні захворювання людей від підвищеної дози космічного опромінення, зниження народжуваності населення і погіршення врожайності сільськогосподарських культур.

2.2 Тепловий вплив об'єктів енергетики на навколишнє середовище

Тепловий вплив об'єктів енергетики, який виявляється в порушенні теплової рівноваги навколишнього середовища, може бути прямим і непрямим. Прямий тепловий вплив визначається тепловими викидами в біосферу, його рівень залежить від об'ємів спалених паливно-енергетичних ресурсів. Практично вся хімічна енергія спалюваного органічного палива перетворюється на теплову, причому частина цієї енергії викидається в концентрованому вигляді в навколишнє середовище на самому енергетичному об'єкті: з димовими газами, охолоджувальною водою, частково із золою та

шлаком. Решта розсіюється на різних стадіях виробництва, передавання та споживання електричної або теплової енергії, які виробляє енергооб'єкт.

Прямі теплові викиди енергетичних об'єктів не можуть вплинути на тепловий баланс у глобальних масштабах. Однак вони можуть змінити локальний тепловий баланс в атмосфері і гідросфері, що є причиною зміни мікроклімату в місцях високої концентрації енерговиробництва та енергоспоживання. Відомий феномен перевищення температури повітря у великих містах порівняно із сільською місцевістю на 2–3 °С. Він пов'язаний з утворенням областей з підвищеним локальним викидом теплової енергії в атмосферу – так званих "островів теплоти".

Вплив "острова теплоти" на інші атмосферні процеси різноманітний. Існує прямий зв'язок "островів теплоти" з утворенням туманів, збільшенням атмосферних опадів. Основним фактором теплового впливу на ріки або водойми є підвищення температури води в місці скидання нагрітої води, що зумовлює підвищення середньої температури поверхні водоймища. Якщо істотно порушено температуру водойм, а також їх гідрологічний режим, бурхливо розвиваються синьо-зелені водорості і як результат цього – цвіте вода, істотно знижується вміст кисню в ній. При цьому можуть кризово змінитися умови розвитку рослиноїдних риб.

Істотним фактором теплового забруднення навколишнього середовища є непрямі впливи – дія парникових газів, підвищення концентрацій яких в атмосфері спричиняє "парниковий ефект".

Земна атмосфера одержує визначену кількість сонячного випромінювання (ультрафіолетові промені). Не менше 30% цього випромінювання відразу відбивається в космічний простір хмарами, атмосферним пилом, молекулами повітря і подекуди поверхнею Землі (ділянки, покриті снігом і льодом). Решту сонячного випромінювання поглинає поверхня океанів і материків і, меншою мірою, водяна пара, аерозолі, озон і хмари. Поглинена ними енергія випромінюється назад у космос у вигляді інфрачервоного випромінювання. При цьому частину радіації, яка виходить від поверхні Землі (в інфрачервоній області спектра випромінювання), на зворотному шляху в космос поглинають хмари і триатомні гази, які містяться в атмосфері (CO_2 , SO_2 , NO_2 , O_3 та ін.), що характеризуються селективною поглинальною спроможністю саме в інфрачервоній області випромінювання. Повторне поглинання інфрачервоного випромінювання (реабсорбція) зумовлює парниковий ефект. Основним парниковим газом вважають CO_2 . Вважають, що до 2030 р. вміст вуглекислого газу, порівняно з початком промислової ери, подвоїться. Це може призвести до підвищення середньої температури Землі на 2–3 °С у помірних широтах і до 10 °С на полюсах. У результаті такого потепління і пов'язаного з ним танення криги може підвищитися (на 5–6 м і більше) рівень Світового океану і його води поглинуть величезні території суші.

2.3 Шумовий вплив об'єктів енергетики на навколишнє середовище

Шум – це будь-який небажаний звук або сукупність звуків з частотами і фазами, розподіленими нерегулярно в часі. Шум дуже впливає на людину, навколишнє середовище. Щодо впливу шуму на навколишнє середовище виділяють медичний, соціальний та економічний аспекти, які потрібно розглядати у взаємозв'язку.

Медичний аспект впливу на людину пов'язаний з тим, що шум погіршує її функціональний стан. Функціональні розлади нервової системи настають раніше, ніж зниження слухової чутливості. Медики відзначають "шумову хворобу", що характеризується комплексом симптомів: зниженням слухової чутливості, зміною функції травлення, серцево-судинною недостатністю, нейроендокринним розладом.

Соціальний аспект пов'язаний з тим, що шумового впливу зазнають великі групи населення, особливо у великих містах. За деякими даними, понад 60% населення великих міст проживає в умовах надмірного шуму.

Економічний аспект зумовлений тим, що шум підвищує стомлюваність і впливає на продуктивність праці, а ліквідація наслідків шумового впливу на людину потребує значних соціальних витрат. Збільшення рівня звуку на 1–2 дБ знижує продуктивність праці на 1% (якщо рівень звуку більше 80 дБ). Наприклад, продуктивність праці на роботах, що потребують підвищеної уваги, зі збільшенням рівня звуку від 70 до 90 дБ падає на 20%. Доведено, що шум зменшує зорову реакцію, що разом зі стомлюваністю різко збільшується ймовірність помилок у роботі операторів. Це особливо недопустимо, наприклад, для енергетичного виробництва, де важливу роль відіграє надійність.

Контрольні питання

1. Загальна характеристика впливу теплової енергетики на навколишнє середовище.
2. Дайте характеристику газових і аерозольних викидів ТЕС.
3. Проаналізуйте сукупний вплив газових і аерозольних викидів енергетичних об'єктів на навколишнє середовище.
4. Поясніть механізм утворення опадів і кислотних дощів.
5. Тепловий вплив об'єктів енергетики на навколишнє середовище.
6. Особливості виникнення парникового ефекту.
7. Особливості шумового впливу об'єктів енергетики на навколишнє середовище.
8. Загальний перелік аспектів впливу шуму на людину.
9. Дайте характеристику загальних аспектів впливу шуму на людину.

3 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З ВІДХІДНИМИ ГАЗАМИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

3.1 Одиниці фізичних величин, що характеризують газоподібні компоненти продуктів згорання

При розрахунковому чи дослідному визначенні складу продуктів згорання знаходяться значення концентрацій їхніх окремих компонентів: об'ємних C_v і масових C_m .

Об'ємна концентрація C_v [2] є відношенням об'єму, який займає дана речовина, до об'єму всієї газової проби. Тому за допомогою об'ємної концентрації описується вміст тільки газоподібних продуктів згорання, наприклад NO_x , SO_x , CO_x та інші. Об'ємні концентрації C_v можуть вимірюватися у відсотках або у мільйонних частках (ppm), 1 ppm (part per million) є однією мільйонною часткою об'єму:

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} = 10^{-4} \% = 1 \text{ см}^3/\text{м}^3. \quad (3.1)$$

Важлива перевага визначення вмісту газових компонентів за допомогою об'ємної концентрації полягає в тому, що об'ємна концентрація не залежить від тиску і температури середовища, і, отже, розрахункові або дослідні результати газового аналізу, виражені у відсотках або мільйонних частках, не потребують приведення до яких-небудь заданих умов за температурою і тиском.

Масова концентрація C_m характеризує кількість (масу) даної речовини в 1 м^3 продуктів згорання. За її допомогою оцінюється вміст у продуктах згорання як твердих (наприклад, зола, бензопірен, пентаоксид ванадію), так і газоподібних компонентів. Масова концентрація може бути виражена в грамах або міліграмах на метр кубічний.

Очевидно, що на відміну від об'ємної, масова концентрація залежить від тиску і температури середовища, тому масову концентрацію приводять в перерахунку на нормальні умови ($0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=760 \text{ мм.рт.ст.}=101,3 \text{ кПа}$), для чого використовується такий вираз:

$$C_m^{\text{н.у.}} = C_m^{\text{д.ш.}} \cdot \frac{273 + t_r}{273} \cdot \frac{P_0}{P_r}, \quad (3.2)$$

де $C_m^{\text{д.ш.}}$ – масова концентрація, отримана дослідним шляхом за температури газів t_r і тиску газової проби.

З урахуванням температури t_r і тиску P_r газової проби перед газоаналізатором (останнє прирівнюється до фактичного атмосферного тиску) зв'я-

зок між об'ємною (ppm) і масовою (г/м³) концентрацією встановлюється таким співвідношенням [2]:

$$C_m = k_i \cdot C_{Vi}, \quad (3.3)$$

де k_i – коефіцієнт перерахунку;

$$k_i = 10^{-3} \cdot \frac{\mu_i}{V_{\mu i}} \cdot \frac{273}{273 + t_r} \cdot \frac{P_r}{P_0}, \quad (3.4)$$

де μ_i – молекулярна маса i -ої речовини, г; $V_{\mu i}$ – молярний об'єм, л (як перше наближення за $V_{\mu i}$ може бути прийнятий об'єм ідеального газу, що дорівнює 22,4 л).

Значення коефіцієнта перерахунку k_i для деяких реальних газоподібних речовин за нормальних умов наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта перерахунку для реальних газів за нормальних умов (0 °С, 101,3 кПа)

Речовина	Молекулярна маса μ_i , г	Молярний об'єм $V_{\mu i}$, л	Коефіцієнт перерахунку k_i
O ₂	32	22,39	1,43
CO	28,01	22,4	1,25
CO ₂	44,01	22,26	1,98
H ₂ S	34,08	22,14	1,54
SO ₂	64,06	21,89	2,93
NO	30,01	22,41	1,34
NO ₂	46,01	22,41	2,05

Залежно від застосовуваного методу вимірювання вміст газових компонентів визначається в мокрих або сухих продуктах згорання.

Мокрі гази (або вологі продукти згорання) – це звичайні продукти згорання, що містять водяні пари, які утворилися при спалюванні вуглеводневого палива і за рахунок вологості повітря. Обсяг мокрих газів розраховується за формулою

$$V_r = V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0, \quad (3.5)$$

де V_r^0 , V^0 – теоретичні обсяги димових газів і повітря відповідно (при $\alpha = 1$), м³/кг (м³/м³); α – коефіцієнт надлишку повітря.

Під сухими продуктами згорання (*сухими газами*) мають на увазі димові гази, у яких відбулася конденсація утвореної в процесі горіння палива водяної пари через їхнє охолодження до температури нижче температури насичення. Об'єм сухих продуктів згорання

$$V_{\text{с.г.}} = V_{\text{г}}^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0, \quad (3.6)$$

де $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ – теоретичний об'єм водяної пари, $\text{м}^3/\text{м}^3$ ($\text{м}^3/\text{кг}$).

Відповідно до нормативів [2] і для коректного зіставлення дослідних даних, отриманих під час вимірювань, масові або об'ємні концентрації необхідно перераховувати на стандартні умови: коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,4$ в сухих продуктах згорання за нормальних умов (температура 0°C і тиск $101,3$ кПа).

Для перерахунку дослідних концентрацій на стандартні умови використовуються формули (3.7 – 3.10).

Для перерахунку дослідних даних ($C^{\text{д}}$), отриманих для сухих газів, на стандартні умови ($C^{\text{ст.у.}}$) для сухих газів:

об'ємна концентрація, ppm (%)

$$C_{\text{V}}^{\text{ст.у.}} = C_{\text{V}} \cdot \frac{V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0}, \quad (3.7)$$

масова концентрація, $\text{г}/\text{м}^3$

$$C_{\text{m}}^{\text{ст.у.}} = C_{\text{m}} \cdot \frac{273 + t_{\text{г}}}{273} \cdot \frac{P_0}{P_{\text{г}}} \cdot \frac{V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0}. \quad (3.8)$$

Для перерахунку дослідних даних, отриманих для мокрих газів, на стандартні умови для сухих газів:

об'ємна концентрація, ppm (%)

$$C_{\text{V}}^{\text{ст.у.}} = C_{\text{V}} \cdot \frac{V_{\text{г}}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0}, \quad (3.9)$$

масова концентрація, $\text{г}/\text{м}^3$

$$C_{\text{m}}^{\text{ст.у.}} = C_{\text{m}} \cdot \frac{273 + t_{\text{г}}}{273} \cdot \frac{P_0}{P_{\text{г}}} \cdot \frac{V_{\text{г}}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0}, \quad (3.10)$$

де t_r – температура газів у вимірювальному перетині газоходу при використанні безпробовідбірних вимірювальних систем або температура газів перед газоаналізатором при відборі проби продуктів горіння з газового тракту, °С.

Крім концентрацій шкідливих речовин як екологічних параметрів котлів часто використовують питомі або валові (масові) викиди.

Потужність викиду M , г/с, – це кількість шкідливої речовини, що викидається в атмосферу з димовими газами в одиницю часу за 1 с. Потужність викиду шкідливої речовини за певний період часу (місяць, квартал, рік) називається *валовим викидом* (визначеним, наприклад, в тоннах за 1 рік).

Питомий масовий викид, г/кг (або г/м³), являє собою кількість шкідливої речовини в грамах, що утворилась при спалюванні 1 кг (або 1 м³) палива:

$$m_i = C_i \cdot V_r, \quad (3.11)$$

де V_r – фактичний обсяг продуктів згорання.

Часто цей показник перераховують на одиницю маси умовного палива, г/кг або кг/т умовного палива (далі г/кг у.п. або кг/т), і тоді він розраховується так:

$$m_i^* = C_i \cdot V_r \cdot (Q_{y.n} / Q_n^p), \quad (3.12)$$

де $Q_{y.n}$ – теплота згорання умовного палива, рівна 29,33 МДж/кг.

Питомі викиди (по теплу) K_i , г/МДж:

$$K_i = M_i / (B_p \cdot Q_n^p). \quad (3.13)$$

Визначення масових викидів забруднювальних речовин, що є основним завданням інспекційного контролю джерел забруднення атмосфери, може бути проведено розрахунковим шляхом або на основі безпосереднього вимірювання концентрацій речовин і швидкості газового потоку у вимірювальному перетині.

Для перерахунку названих параметрів використовуються такі співвідношення:

$$K_i = C_i \cdot V_r / Q_n^p; \quad (3.14)$$

$$M_i = C_i \cdot B_p \cdot V_r; \quad (3.15)$$

$$M_i = K_i \cdot V_p \cdot Q_n^p, \quad (3.16)$$

де C_i – масова концентрація i -ої речовини за нормальних умов, г/м^3 ;

V_p – об'єм димових газів, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$), який визначається таким чином: при концентрації C_i , визначеної в мокрих газах за формулою (3.5); в сухих – за формулою (3.6).

3.2 Класифікація шкідливих речовин

Всі шкідливі речовини, наявні в продуктах згорання палив, з врахуванням технології їхнього спалювання поділяють на три групи [2].

До першої групи належать шкідливі речовини, кількість яких у продуктах згорання мало залежить від технології спалювання і може бути з достатньою точністю визначена на основі складу палива (діоксид сірки SO_2 , сполуки ванадію V_2O_5 , летка зола).

До другої групи належать шкідливі продукти згорання, утворення яких залежить як від складу палива, так і від технологічних, конструктивних і режимних умов спалювання палива (оксид вуглецю, оксид азоту, поліароматичні вуглеводні та інші речовини).

До третьої групи належать шкідливі речовини, поява яких обумовлена побічними явищами технологічного процесу: запиленням вугільних складів і золовідвалів, виділенням парів вуглеводнів в системах зливу мазуту, викидами тонких фракцій вугільного пилу в розімкнутих системах пилоприготування та ін.

За мірою небезпеки (токсичності) продукти згорання поділяють на п'ять класів [2]: надзвичайно небезпечні (бензопірен, V_2O_5); небезпечні (NO_2 , H_2S , летка зола при масовій частці не менше 35%); помірно небезпечні (NO , SO_2 , SO_3 , сажа, летка зола при масовій частці CaO менше 35%, неорганічний пил); малонебезпечні (NH_3 , CO); безпечні (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O).

3.3 Гранично допустима концентрація

Гранично допустимою концентрацією називається така концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі на рівні дихання людини, яка не чинить на організм людини прямої чи непрямої негативної дії.

Гранично допустима концентрація (ГДК) є основним критерієм санітарно-гігієнічного оцінювання якості повітря.

Міра небезпеки впливу шкідливої речовини на живий організм визначається відношенням концентрації речовини C_i до гранично допустимої його концентрації (ГДК_i), мг/м^3 , в зоні перебування людини: $K_i = C_i / \text{ГДК}_i$. Значення K_i повинно бути менше 1. При одночасному вмісті в повітрі декі-

льких шкідливих речовин міра небезпеки оцінюється як сумарний вплив кожного із шкідливих компонентів за формулою

$$\frac{C_{\text{NO}_2}}{\text{ГДК}_{\text{NO}_2}} + \frac{C_{\text{NO}}}{\text{ГДК}_{\text{NO}}} + \frac{C_{\text{SO}_2}}{\text{ГДК}_{\text{SO}_2}} + \frac{C_{\text{SO}_3}}{\text{ГДК}_{\text{SO}_3}} + \frac{C_{\text{CO}}}{\text{ГДК}_{\text{CO}}} \leq 1. \quad (3.17)$$

Для викидів твердих частинок

$$\frac{C_{\text{зл}}}{\text{ГДК}_{\text{зл}}} + \frac{C_{\text{с}}}{\text{ГДК}_{\text{с}}} + \frac{C_{\text{V}_2\text{O}_5}}{\text{ГДК}_{\text{V}_2\text{O}_5}} < 1, \quad (3.18)$$

де $C_{\text{зл}}$ і $C_{\text{с}}$ – концентрація золових і сажистих елементів; $C_{\text{V}_2\text{O}_5}$ – концентрація V_2O_5 в твердих викидах.

В нашій країні прийняті три види норм викидів шкідливих речовин в атмосферу: гранично допустимі концентрації в робочій зоні $\text{ГДК}_{\text{р.з.}}$; $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$ – максимально разові; $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$ – середньодобові. В таблиці 3.2 наведені допустимі концентрації (ГДК) шкідливих викидів для котелень.

Таблиця 3.2 – Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих викидів котелень, мг/м^3

Речовина	ГДК _{м.р.}	ГДК _{с.д.}
Діоксид азоту NO_2	0,085	0,085
Монооксид азоту NO	0,25	0,25
Сірчаний ангідрид, SO_3	0,3	0,1
Діоксид сірки, SO_2	0,5	0,05
Монооксид вуглецю, CO	3	1
Сірководень, H_2S	0,008	0,08
Сажа	0,15	0,15
V_2O_5	–	0,002
Пил	0,5	0,15
Бензопірен ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$)	–	$1 \cdot 10^{-6}$

3.4 Методи визначення кількості шкідливих викидів з продуктами згорання

3.4.1 Розрахунок утворення оксидів сірки і температури точки роси продуктів згорання під час спалювання мазуту і твердих палив

Оксиди сірки у вигляді діоксиду SO_2 і триоксиду SO_3 утворюються в зоні горіння мазуту і твердих палив, що містять зв'язану сірку S^p . Під час спалювання природного газу утворення оксидів сірки може мати місце в незначній кількості за наявності в паливі сірководню H_2S .

Об'ємна частка діоксиду сірки

$$p_{so_2} = 0,007 \cdot S^p / V_r. \quad (3.19)$$

Вміст надлишкового кисню, %

$$O_2 = \frac{21 \cdot (\alpha_r - 1) \cdot V_{пов}^0}{V_r}. \quad (3.20)$$

Відсотковий вміст SO_3 , %

$$SO_3 = 0,424 \cdot p_{so_2} \cdot O_2^{0.5} \cdot q_f \cdot (Q / Q_n)^2, \quad (3.21)$$

де Q , Q_n – поточна та номінальна потужність парового котла, q_f – теплова напруга перерізу топки, MBT/m^2 .

Масова концентрація SO_2 у відхідних газах, г/кг

$$g_{so_2} = 2,86 \cdot 10^3 \cdot (p_{so_2} - 0,01 \cdot SO_3) \cdot V_r \cdot (\alpha_r / \alpha_{вг}). \quad (3.22)$$

Масовий викид SO_2 , г/с

$$M_{so_2} = B_p \cdot g_{so_2}. \quad (3.23)$$

Температура точки роси під час спалювання мазуту t_p залежно від концентрації SO_3 , % визначається за формулами

$$t_p = 50 + 11 \cdot A_{so_3}^{0,7} \quad (\text{при } SO_3 \leq 2 \cdot 10^{-3} \%), \quad (3.24)$$

$$t_p = 50 + 50 \cdot A_{so_3}^{0,2} \quad (\text{при } SO_3 > 2 \cdot 10^{-3} \%), \quad (3.25)$$

де $A_{\text{SO}_3} = \text{SO}_3 \cdot 10^4$.

В мінеральному складі твердих палив містяться лужні сполуки, які в значній кількості нейтралізують утворені оксиди сірки SO_3 , тому кінцевий вміст SO_3 у відхідних газах і температура точки роси залежать від зольності палива A^p . В цьому випадку визначають спочатку температуру

$$t_p = t_{\text{конд}} + 202(S^{\text{п}})^{0,33} / 1,23^{a_{\text{вн}} \cdot A^{\text{п}}}, \quad (3.26)$$

де $S^{\text{п}}$, $A^{\text{п}}$ – приведені до 1 МДж теплоти значення сірки і золи в робочій масі палива, %: $S^{\text{п}} = S^p / Q_{\text{н}}^p$; $A^{\text{п}} = A^p / Q_{\text{н}}^p$;

$t_{\text{конд}}$ – температура конденсації водяних парів, °С, визначається за парціальним тиском $P_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P$, МПа.

Оскільки тверді палива спалюються з надлишками повітря $\alpha_t > 1,1$, то надлишок повітря не впливає на зміну утворення SO_3 .

3.4.2 Розрахунок викидів твердих частинок

Тверді частинки, що знаходяться в димових газах є сукупністю леткої золи і незгорілого в топці палива (коксу). Масовий викид твердих частинок $M_{\text{тв}}$, г/с визначається за формулою

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot V \cdot \left(a_{\text{вн}} \cdot A^p + q_4 \frac{Q_{\text{н}}^p}{32,68} \right) \cdot (1 - \eta_{\text{зв}}), \quad (3.27)$$

де $a_{\text{вн}}$ – частка виносу золи; $\eta_{\text{зв}}$ – частка твердих частинок, що вловлюються в золовловлювачах; V – витрата натурального палива, г/с; 32,68 – теплота згорання вуглецю, МДж/кг.

Кількість леткої золи (мінеральна частина твердих продуктів згорання), яка входить в сумарну кількість твердих частинок, що виносяться в атмосферу

$$M_3 = 0,01 \cdot V \cdot a_{\text{вн}} \cdot A^p \cdot (1 - \eta_{\text{зв}}). \quad (3.28)$$

3.4.3 Визначення викидів мазутної золи

Мазутна зола – це суміш, що складається в основному із оксидів металів. Сумарну кількість мазутної золи $M_{\text{м.з.}}$ в перерахунку на ванадій, г/с (або т), що надходить в атмосферу з димовими газами котла під час спалювання мазуту визначають за формулою

$$M_{\text{м.з.}} = G_v \cdot B \cdot (1 - \eta_{\text{oc}}) \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{zy}}^v}{100}\right) \cdot k_{\text{п}}, \quad (3.29)$$

де G_v – кількість ванадію в 1 т мазуту, г/т; B – витрата натурального палива (при визначенні викидів мазутної золи в г/с, витрата палива B береться в т/год; при визначенні $M_{\text{м.з.}}$ в тоннах витрата B береться в тоннах); η_{oc} – частка ванадію, що залишається з твердими частинками на поверхні нагріву мазутних котлів: для котлів з проміжними пароперегрівниками, очищення поверхонь яких відбувається після зупинки, $\eta_{\text{oc}}=0,07$; для котлів без проміжних пароперегрівників за таких же умов очищення $\eta_{\text{oc}}=0,05$; для інших котлів $\eta_{\text{oc}}=0$; η_{zy}^v – міра очищення димових газів від мазутної золи в золовловлювальних установках, %; $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт перерахунку: при визначенні викидів $M_{\text{м.з.}}$ в г/с – $k_{\text{п}}=0,278 \cdot 10^{-3}$; при визначенні $M_{\text{м.з.}}$ в тоннах – $k_{\text{п}}=10^{-6}$.

Кількість ванадію в мазуті G_v , г/т, обчислюється за одним із двох способів:

за результатами хімічного аналізу мазуту

$$G_v = a_v \cdot 10^4; \quad (3.30)$$

за наближеною формулою (за відсутності даних хімічного аналізу)

$$G_v = 2222 \cdot A^p, \quad (3.31)$$

де A^p – вміст золи в мазуті на робочу масу, %.

Міра очищення газів від мазутної золи (в перерахунку на ванадій) η_{zy}^v , % в спеціально призначених для цього циклонах визначається за формулою

$$\eta_{\text{zy}}^v = 0,076(\eta_{\text{zy.заг}})^{1,85} - 2,32 \cdot \eta_{\text{zy.заг}}, \quad (3.32)$$

де $\eta_{\text{zy.заг}}$ – загальна міра вловлювання твердих частинок, що утворюються при спалюванні мазуту в котлах ТЕС і котельнях, %. Ця залежність дійсна для умови $65\% < \eta_{\text{zy.заг}} < 85\%$.

При сумісному спалюванні мазуту і твердого палива в пиловугільних котлах міра вловлювання мазутної золи в перерахунку на ванадій, %, в золовловлювальних установках визначається за формулою

$$\eta_{\text{zy}}^{\text{v}} = \eta_{\text{y}} \cdot C, \quad (3.33)$$

де η_{y} – зональна міра вловлювання твердих частинок при спалюванні вугілля, %; $C=0,6$ для електрофільтрів, $C=0,5$ для мокрих апаратів, $C=0,3$ для батарейних циклонів.

3.4.4 Визначення викидів монооксиду вуглецю (СО)

Концентрацію монооксиду вуглецю в димових газах розрахунковим шляхом визначити неможливо через суттєву залежність процесів утворення і окислення СО від способу спалювання палива, режимних умов і навіть окремих конструктивних факторів. Тому розрахунок валових викидів СО потрібно виконувати за даними інструментальних вимірювань. Масовий викид монооксиду вуглецю M_{CO} , г/с знаходиться за формулою

$$M_{\text{CO}} = C_{\text{CO}} \cdot V_{\text{c}}, \quad (3.34)$$

де C_{CO} – концентрація СО в димових газах, $\text{г}/\text{м}^3$, визначена за допомогою газоаналізатора; V_{c} – витрата димових газів, $\text{м}^3/\text{с}$, в перерізі газоходу, в якому визначалась концентрація СО.

Існують методики визначення очікуваного масового викиду M_{CO} , але з огляду на їхню низьку точність в навчальному посібнику вони не розглядаються.

3.4.5 Визначення викидів бензопірену

Бензопірен – один із найбільш токсичних продуктів згорання, що належить до групи поліароматичних вуглеводнів (ПАВ). Бензопірен є твердою кристалічною речовиною жовтого кольору з температурою плавлення $179\text{ }^{\circ}\text{C}$ і кипіння $500\text{--}570\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому в газовому тракті котлів $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ залежно від температури продуктів згорання може знаходитися в газоподібному, рідкому (аерозолі) чи твердому стані.

Визначення концентрації бензопірену в димових газах проводиться лише інструментальними вимірюваннями. Однак безпосереднє вимірювання концентрації бензопірену $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ у відхідних газах котла пов'язано із значними труднощами і на сьогоднішній день виконується лише в деяких спеціалізованих організаціях. Розрахункові методики базуються на основі аналізу і узагальнення великої кількості експериментальних даних.

Похибка вимірювання концентрації бензопірену за наведеною нижче методикою становить 20% [2].

Концентрація бензопірену в сухих димових газах при спалюванні мазуту $C_{\text{БП}}^{\text{М}}$ і природного газу $C_{\text{БП}}^{\text{Г}}$, мкг/м³ приведена до надлишку повітря в газах $\alpha=1,4$ розраховується за формулами:

$$C_{\text{БП}}^{\text{М}} = \frac{q_{\text{з.а.г}}^{-0,53} \cdot (0,232 + 0,606 \cdot 10^{-3} \cdot q_v)}{\exp(25 \cdot \alpha'' - 1)} \cdot K_r \cdot K_D \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{вл}} \cdot K_{\text{оч}}, \quad (3.35)$$

$$C_{\text{БП}}^{\text{М}} = \frac{q_{\text{з.а.г}}^{-1,26} \cdot (0,0536 + 0,163 \cdot 10^{-3} \cdot q_v)}{\exp(25 \cdot \alpha'' - 1)} \cdot K_r \cdot K_D \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{вл}}, \quad (3.36)$$

де $q_{\text{з.а.г}}$ – теплова напруга поверхні зони активного горіння, МВт/м²; q_v – теплова напруга топкового об'єму, кВт/м³; α'' – коефіцієнт надлишку повітря в димових газах на виході з топки (при $\alpha'' > 1,08$ у формулах (3.35–3.36) рекомендується приймати $\exp(25 \cdot \alpha'' - 1) = 0,135$); K_r – коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції; K_D – коефіцієнт, що враховує навантаження котла; $K_{\text{ст}}$ – враховує ступеневе спалювання палива; $K_{\text{вл}}$ – коефіцієнт, що враховує подачу вологи; $K_{\text{оч}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення викиду бензопірену при очищенні конвективних поверхонь нагріву при роботі котла.

$$q_{\text{з.а.г}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot B}{2(a_{\text{т}} + b_{\text{т}}) \cdot Z_{\text{яр}} \cdot h_{\text{яр}} + 1,5 \cdot a_{\text{т}} \cdot b_{\text{т}}}; \quad (3.37)$$

$$K_D = (2 - D_{\text{ф}} / D_{\text{н}})^{2,4}; \quad (3.38)$$

$$K_{\text{ст}} = 1 + b \cdot \delta; \quad (3.39)$$

$$K_{\text{вл}} = \exp(-\lambda \cdot g), \quad (3.40)$$

де $Z_{\text{яр}}$ – кількість ярусів пальників; $h_{\text{яр}}$ – відстань за висотою між осями сусідніх пальників, м; $a_{\text{т}}$ – ширина топки (в світлі), м; $b_{\text{т}}$ – глибина топки, м; r – частка рециркуляції димових газів; d – коефіцієнт, що характеризує вплив рециркуляції димових газів на викид бензопірену ($d=1$ при введенні в під топкової камери; при введенні в повітря чи окремий канал пальника $d=4$; при введенні в шліці (сопла) навпроти пальників $d=2$; при введенні в шліці над пальниками $d=2,7$); $D_{\text{ф}}$, $D_{\text{н}}$ – фактичне та номінальне навантаження котла відповідно, кг/с; b – коефіцієнт, що враховує вплив повітря, що подається у другу ступінь горіння (при відключенні половини пальни-

ків верхнього яруса по паливу $b = -1$ (для мазуту) і $b = -0,2$ (для газу); для схеми, що реалізує ступінчасте спалювання "по вертикалі", $b=7$; для схеми, що реалізує ступінчасте спалювання "по горизонталі", $b = -2,7$; δ – частка повітря, що подається у другу ступінь горіння; g – водопаливне співвідношення при подачі вологи в зону горіння; λ – коефіцієнт, що враховує вплив вологи при введенні її в пристінну зону топки і при зональному вприскуванні ($\lambda=15$) і в дуттьове повітря ($\lambda=2$).

Таблиця 3.3 – Значення $K_{оч}$ залежно від умов очищення

Період між очищеннями, год	Дробове очищення конвективних поверхонь нагріву	Обдування регенеративних повітропідігрівників
12 – 24	1,2	1,1
40 – 48	1,5	1,25
72	2	1,5

Для пиловугільних котлів концентрація $C_{20H_{12}}$ в сухих димових газах котлів за золовловлювачами при факельному спалюванні вугілля $C_{БП}^T$, мкг/м³, приведена до надлишку повітря в газах $\alpha = 1,4$, розраховується за формулою

$$C_{БП}^T = \frac{Q_H^p \cdot A}{\exp(1,5 \cdot \alpha_T^n)} \left(\frac{D_\phi}{D_{ном}} \right)^{1,1} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{зв} \cdot Z}{100} \right), \quad (3.41)$$

де A – коефіцієнт, що характеризує конструкцію нижньої частини топки (при рідкому шлаковидаленні $A=0,378$, при твердому – $A=0,521$); $\eta_{зв}$ – ККД золовловлювача (за золою), %; Z – коефіцієнт, що враховує зниження здатності золовловлювачів вловлювати $C_{20H_{12}}$ (для сухих апаратів $Z=0,7$, для мокрих – $Z=0,8$).

3.4.6 Визначення викидів оксидів азоту NO_x

Існує декілька методик, що дозволяють визначати концентрації чи масовий викид оксидів азоту для парових і водогрійних котлів залежно від їхньої продуктивності, виду спалюваного палива, режимних і конструктивних умов. Наведемо одну з них [3].

Утворення термічних оксидів азоту

Визначальними характеристиками під час утворення термічних оксидів є максимальна температура факела T_m і температурний інтервал реакції

ΔT_p . Розрахункове значення T_m залежить від умовної адіабатної температури в зоні горіння T'_a :

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_r^0 \cdot c_r + 1,016 \cdot (\alpha_{гор} - 1) \cdot V_{пов}^0 \cdot c_{пов}} + 273, \quad (3.42)$$

де $Q'_T = Q_H^p \cdot 10^3 + Q_{г.в.} + Q_{пал}$ – тепловиділення в зоні горіння, кДж/кг; Q_H^p – теплота згорання, МДж/кг; c_r і $c_{пов}$ – теплоємності газу і повітря, отримані за очікуваної адіабатної температури, кДж/(м³К); $\alpha_{гор}$ – надлишок повітря в зоні горіння; приймається за наявності присмоктувань повітря в топку $\Delta\alpha_T$ таким: $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$, для газощільних котлів $\alpha_{гор} = \alpha_T$.

Ефект рециркуляції газів на температурний рівень враховується при розрахунку максимальної температури факела T_m .

Середня теплоємність продуктів згорання і повітря визначається за формулами:

під час спалювання твердого палива

$$c_r = (1,59 + 0,004 \cdot W^п) + 0,14 \cdot k_t; \quad (3.43)$$

під час спалювання природного газу

$$c_r = 1,57 + 0,134 \cdot k_t; \quad (3.44)$$

під час спалювання мазуту

$$c_r = 1,58 + 0,122 \cdot k_t, \quad (3.45)$$

де $W^п = W^p / Q_H^p$ – приведена вологість палива, % кг/МДж;

$k_t = (t_a - 1200) / 1000$ – температурний коефіцієнт зміни теплоємності;

t_a – очікувана адіабатна температура, °С.

Теплоємність повітря за високих температур

$$c_{пов} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t. \quad (3.46)$$

Очікувану адіабатну температуру для розрахунку теплоємностей знаходять за формулами:

для твердого палива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + 10^{-5} \cdot Q'_T); \quad (3.47)$$

для мазуту і природного газу

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} \cdot Q'_T). \quad (3.48)$$

Допустиме розходження між попередньо прийнятою t_a і отриманим за формулою (3.42) значенням $T'_a - 273$ не повинно перевищувати 50 °С, інакше необхідно прийняти нове значення $t_a = T'_a - 273$ і уточнити значення c_T і $c_{\text{пов}}$.

$$T_M = \beta_{\text{с.г.}} \cdot T'_a \cdot (1 - \psi_{\text{з.г.}})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+nr}) \cdot m_r, \quad (3.49)$$

де $\beta_{\text{с.г.}}$ – частка палива, що згоріло на ділянці від виходу із пальника до завершення інтенсивного високотемпературного горіння; значення $\beta_{\text{с.г.}}$ брати: для твердих палив $0,95-0,97$ (більші значення для реакційних палив), для природного газу і мазуту $0,97-0,99$; $\psi_{\text{з.г.}}$ – коефіцієнт теплової ефективності екранів в зоні ядра факела, за необхідності усереднення теплосприйняття екранів приймати верхню границю зони горіння на $1,5$ м вище верхнього яруса пальників; r – частка рециркуляції газів в зону горіння; n – коефіцієнт, що враховує спосіб введення газів, що рециркулюють в топку: $n=6,5$ – при введенні через сопла під пальниками; $n=5$ – при введенні через кільцевий канал кругом пальника; $n=3$ – при змішуванні газів з гарячим повітрям до пальника або введенні між центральним і периферійними каналами пальника; m_r – коефіцієнт, що враховує тип пальника: $m_r=1$ – для вихрових настінних пальників; $m_r = 0,95 \cdot (25 / w_{\text{пов}})^{0,2}$ – для прямоочних настінних пальників, де $w_{\text{пов}}$ – швидкість повітря, м/с; $m_r=0,985$ – для подових пальників з прямоочно-вихровим подаванням повітря.

Теоретичний час досягнення рівноважної концентрації оксиду азоту NO за температури реакції T_M

$$\tau_0 = 0,024 \cdot \exp(54290 / T_M - 23). \quad (3.50)$$

Розрахункова тривалість реакції утворення оксидів азоту в топці

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_r} \left(\frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right) \cdot \tau_n, \quad (3.51)$$

де ΔT_p – температурний інтервал активної реакції утворення оксидів азоту, К, залежить від значення T_m і визначається за формулою

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_m \cdot 10^{-5}}; \quad (3.52)$$

$q_f = \frac{B \cdot Q_n^p}{a_t \cdot b_t}$ – середня теплова напруга перерізу топкової камери, МВт/м²;

$\Pi = 2a_t + 2b_t$ – розрахунковий периметр стін призматичної топкової камери, м (за наявності двосвітного екрана додається його подвоєна ширина); T''_r – абсолютна температура газів на виході з топки, К, береться з теплового розрахунку котла; τ_n – тривалість перебування газів в топковій камері, с:

$$\tau_n = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \bar{T}_r \cdot v''_r \cdot \alpha_r \cdot (1+r)}, \quad (3.53)$$

де $q_v = \frac{B \cdot Q_n^p}{V_t}$ – теплова напруга топкового об'єму, МВт/м³;

$\bar{T}_r = 0,84 \cdot \left[(T_m)^4 + (T''_r)^4 \right]^{0,25}$ – середня розрахункова температура газів в топковому об'ємі при $\alpha = 1$, м³/МДж; в розрахунках потрібно брати для антрациту і напівантрациту $v''_r = 0,273$ м³/МДж, для інших твердих палив $v''_r = 0,278 + 0,001 \cdot W^p$, для мазуту 0,281 м³/МДж, для природного газу 0,3 м³/МДж; ξ – коефіцієнт заповнення перерізу топки висхідним потоком газів, при зустрічних вихрових пальниках $\xi = 0,8$, те ж для однофронтального розташування 0,75, для тангенціального розташування прямоочних пальників 0,7, для подових пальників 0,9.

Концентрація оксидів азоту, що утворюються за рахунок термічної реакції в зоні ядра факела, в перерахунку на діоксид азоту NO_2^{tp} , г/м³, визначається за формулою

$$\text{NO}_2^{\text{tp}} = 7,03 \cdot 10^3 \cdot C_{\text{O}_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860 / T_m) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (3.54)$$

де C_{O_2} – концентрація надлишкового кисню в зоні реакції, кг/м^3 , визначається за формулою

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_{\text{пов}}^0 \left[(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r \cdot (\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}}) \right] \cdot \rho_{O_2}}{[V_r^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^0] \cdot (1 + r)}, \quad (3.55)$$

де $\alpha_{\text{рц}}$ – надлишок повітря в газах рециркуляції; $\rho_{O_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$ – густина кисню при атмосферному тиску. У випадках, коли значення $\alpha_{\text{гор}} - 1$ виявиться менше 0,02, умовно приймати його сталим і рівним 0,02.

Концентрація паливних і швидких оксидів азоту. Сумарна концентрація оксидів в газах

Утворення цього виду оксидів відбувається в діапазоні температур 800–2100 К і найбільшу інтенсивність має в області 1850 К. Вихід паливних оксидів $\text{NO}_2^{\text{пал}}$, г/м^3 в цій зоні залежить від надлишку повітря, від температури і вмісту азоту в паливі $N^{\text{п}}$.

Розрахункові формули для двох температурних зон:
для значень температур $2100 > T_m \geq 1850 \text{ К}$

$$\text{NO}_2^{\text{пал}} = (0,4 - 0,1 \cdot N^{\text{п}}) N^{\text{п}} \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{2100 - T_m}{125} \right)^{0,33}; \quad (3.56)$$

для значень температур $1850 > T_m > 800 \text{ К}$

$$\text{NO}_2^{\text{пал}} = 1,25 \cdot (0,4 - 0,1 \cdot N^{\text{п}}) N^{\text{п}} \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_m - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (3.57)$$

Ці формули враховують одночасно і утворення швидких оксидів азоту. Максимальна сумарна концентрація оксидів азоту при номінальному навантаженні котла:

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{тр}} + \text{NO}_2^{\text{пал}}. \quad (3.58)$$

При пониженому навантаженні парового котла сумарний вихід оксидів азоту визначається за формулою, г/м^3

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{тр}} \cdot (D / D_{\text{ном}}) + \text{NO}_2^{\text{пал}} \cdot (D / D_{\text{ном}})^{0,5}, \quad (3.59)$$

де $D/D_{\text{ном}}$ – відношення розрахункового навантаження котла до номінального.

При переході на двоступеневе (нестехіометричне) спалювання палива розрахунок максимальної температури факела T_m проводять за формулою (3.49) для першої (нижньої) зони горіння палива. Надлишок повітря в пальниках першої зони визначається заданим розподіленням надходження повітря по зонах і аналогічним розподіленням палива та визначається за формулою

$$\alpha'_{\text{гор}} = \frac{\alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T - \beta_2}{\bar{B}_1}, \quad (3.60)$$

де β_2 – частка повітря, що надходить у другу ступінь горіння: $\bar{B}_1 = B_1 / B$ – частка палива, що надходить в першу зону. За наявності скидних пальників з врахуванням ККД циклона $\bar{B}_1 = 0,88 - 0,94$. Розрахунковий надлишок повітря в пальниках другої зони горіння

$$\alpha''_{\text{гор}} = \beta_2 + 0,5\Delta\alpha_T. \quad (3.61)$$

Частка палива, що згоріла в першій (нижній) зоні горіння, визначається відносною кількістю повітря в першій зоні з врахуванням неповноти згорання:

$$\beta_{\text{сг}}^1 = 0,95 \cdot \alpha_{\text{гор}}^1. \quad (3.62)$$

Розрахунок температури T_m виконують за формулою (3.49) для значення $\beta_{\text{сг}}^1$. Адіабатна температура горіння визначається за формулою (3.42) для повного надлишку повітря на виході із верхньої області горіння, тобто по $\alpha_{\text{гор}} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$ незалежно від ступінчастої організації спалювання.

Особливості розрахунку оксидів азоту при спалюванні природного газу

Спалювання природного газу характеризується більш швидким протіканням реакцій горіння. В результаті скорочується зона активного горіння і росте максимальна температура. Тому в більшості випадків (при інших рівних умовах) концентрація оксидів азоту отримується дещо вища, ніж при спалюванні мазуту (приблизно $\text{NO}_2^{\text{газ}} = 1,3 \cdot \text{NO}_2^{\text{маз}}$). Оскільки в природному газі немає паливного азоту, при згоранні газу можуть утворюватись лише швидкі оксиди азоту $\text{NO}_2^{\text{шв}}$.

При розрахунку термічних оксидів азоту потрібно виходити із методики, викладеної в формулах (3.42)–(3.55). Розрахунок максимальної температури виконується за формулою 3.49, але для врахування підвищеної швидкості реакцій горіння вводиться поправка і розрахункова температура приймається

$$T'_M = 1,01 \cdot T_M, \quad (3.63)$$

де T_M – максимальна температура за (3.49), К.

Розрахунок швидких оксидів азоту проводиться за формулою, г/м^3

$$\text{NO}_2^{\text{шв}} = 0,1 \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left(\frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (3.64)$$

Сумарна концентрація оксидів азоту, г/м^3

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{тп}} + \text{NO}_2^{\text{шв}}. \quad (3.65)$$

3.4.7 Визначення викидів парникових газів

Триатомні гази називають "парниковими газами". Основним газом, який зумовлює парниковий ефект, вважають вуглекислоту CO_2 .

Очікуваний валовий викид вуглекислоти [1], кг/с

$$M_{\text{CO}_2} = 0,04 \cdot C^p \cdot B. \quad (3.66)$$

Очікуваний валовий викид водяної пари [1], кг/с

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,09 \cdot H^p \cdot B. \quad (3.67)$$

Існує ще один підхід до визначення валових викидів вуглекислого газу [4].

Обсяг викиду CO_2 безпосередньо пов'язано із вмістом вуглецю в паливі та ступенем окислення вуглецю палива в енергетичній установці.

Показник емісії діоксиду вуглецю k_{CO_2} , г/ГДж , під час спалювання органічного палива визначається за формулою

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^p}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_H^p} \varepsilon_C = 3,67 k_C \varepsilon_C, \quad (3.68)$$

де C^p – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %; Q_n^p – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг; ε_c – ступінь окислення вуглецю палива; k_c – показник емісії вуглецю палива, г/ГДж.

Масовий вміст вуглецю в паливі визначається на основі елементного аналізу палива, що спалюється. Для газоподібного палива його може бути визначено, якщо відомий об'ємний вміст компонентів газоподібного палива за методикою [4].

Специфічний показник емісії вуглецю k_c , г/ГДж – це відношення вмісту вуглецю палива до його теплоти згорання:

$$k_c = \frac{C^p}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_n^p}, \quad (3.69)$$

де C^p – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %; Q_n^p – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг.

За відсутності даних про вміст вуглецю в паливі та його теплоту згорання необхідно користуватись узагальненим показником емісії вуглецю, наведеним у таблицях 3.4, 3.5.

Таблиця 3.4 – Показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} , г/ГДж

Показник	Тверде паливо	Мазут	Природний газ
Факельне спалювання:	–	15	17
Котел з рідким шлаковидаленням	11,4	–	–
Котел з твердим шлаковидаленням	11,4	–	–
Спалювання в киплячому шарі	9,7	–	–
Спалювання в нерухомому шарі	121	–	–
Спалювання в камері згорання ГТУ	–	15	15

Таблиця 3.5 – Показник емісії вуглецю палива

Паливо	Значення k_c , г/ГДж
Вугілля:	
Антрацит	28 160
Пісче	26 050
Газове та довгополуменеве	25 180
Буре	25 630
Мазут	21 100
Природний газ	15 300

Під час спалювання органічного палива в енергетичній установці може утворюватись монооксид вуглецю, але в атмосфері він неодмінно перетвориться в діоксид вуглецю. Тому під час розрахунку показника емісії CO_2

вважають, що весь вуглець палива, який згорів, перетворюється у вуглекислий газ.

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 їхнього одночасного спільного спалювання:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \cdot \sum_i k_{ji} \cdot V_i \cdot (Q_H^p)_i, \quad (3.70)$$

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

3.5 Перерахунок вмісту забруднювальних речовин у відхідних газах на об'ємний вміст кисню 6% і приведення до нормальних умов

Концентрація j -ої забруднювальної речовини в сухих димових газах c_j , мг/м³, для нормальних умов (температура 0 °С, тиск 101,3 кПа), перерахована на об'ємний вміст кисню у відхідних газах 6% (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,4$) визначається залежно від типу засобів вимірювання і при індикації значень в масових одиницях і при відборі газів на аналіз з осушуванням розраховується відповідно з пунктом 3.5.1; при індикації значень в масових одиницях і при відборі газів на аналіз без осушування відповідно з пунктом 3.5.2; при індикації значень в об'ємних одиницях і при відборі газів на аналіз з осушуванням відповідно з пунктом 3.5.3; при індикації значень в об'ємних одиницях і при відборі газів на аналіз без осушування відповідно з пунктом 3.5.4 [5].

3.5.1 Визначення концентрації забруднювальної речовини в масових одиницях при відборі газів на аналіз з осушуванням

При індикації значень в масових одиницях і при відборі газів на аналіз з осушуванням концентрація j -ої забруднювальної речовини

$$c_j = c_j^{\text{meas}} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{101,3}{(P_b \pm \Delta P)} \cdot \frac{\alpha}{1,4}, \quad (3.71)$$

де c_j^{meas} – виміряна масова концентрація j -ої забруднювальної речовини, мг/м³; t_g – температура відхідних димових газів в момент проведення вимірювань, °С; P_b – барометричний тиск повітря в момент проведення

вимірювань, кПа; ΔP – надлишковий тиск (розрідження) газів в місці відбору проб, кПа; α – коефіцієнт надлишку повітря в місці відбору проб.

3.5.2 Визначення концентрації забруднювальної речовини в масових одиницях при відборі газів на аналіз без осушування

При індикації значень в масових одиницях і при відборі газів на аналіз без осушування проби концентрація j -ої забруднювальної речовини визначається за формулою

$$c_j = \frac{c_j^{\text{meas}}}{\left(1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_b}\right)} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{101,3}{(P_b \pm \Delta P)} \cdot \frac{\alpha}{1,4}, \quad (3.72)$$

де $P_{\text{H}_2\text{O}}$ – парціальний тиск водяних парів на лінії насичення за температури навколишнього середовища, кПа, визначається з таблиці 3.6.

3.5.3 Визначення концентрації забруднювальної речовини в об'ємних одиницях при відборі газів на аналіз з осушуванням

При індикації значень в об'ємних одиницях і при відборі газів на аналіз з осушуванням концентрація j -ої забруднювальної речовини визначається за формулою

$$c_j = I_j \cdot \rho_j \cdot \frac{\alpha}{1,4}, \quad (3.73)$$

де I_j – виміряна об'ємна концентрація j -ої забруднювальної речовини, ppm (1 ppm = 0,0001%об.);

ρ_j – коефіцієнт перерахунку для j -ої забруднювальної речовини об'ємної концентрації до нормальних умов, мг/м³, для оксиду вуглецю 1,25 мг/м³, для оксидів азоту 2,05 мг/м³, для діоксиду сірки 2,86 мг/м³.

3.5.4 Визначення концентрації забруднювальної речовини в об'ємних одиницях при відборі газів на аналіз без осушування

При індикації значень в об'ємних одиницях і при відборі газів на аналіз без осушування проби концентрації j -ої забруднювальної речовини

$$c_j = \frac{I_j \cdot \rho_j}{\left(1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_b}\right)} \cdot \frac{\alpha}{1,4}. \quad (3.74)$$

Коефіцієнт надлишку повітря у місці відбору проби

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}, \quad (3.75)$$

де O_2 – виміряна концентрація кисню в місці відбору проби відхідних димових газів, %.

Таблиця 3.6 – Значення парціального тиску водяної пари на лінії насичення залежно від температури навколишнього середовища

t, °C	P _{H₂O} , кПа	t, °C	P _{H₂O} , кПа	t, °C	P _{H₂O} , кПа
0	0,611	11	1,313	22	2,645
1	0,657	12	1,403	23	2,811
2	0,706	13	1,498	24	2,986
3	0,758	14	1,599	25	3,170
4	0,813	15	1,705	26	3,364
5	0,872	16	1,818	27	3,564
6	0,935	17	1,938	28	3,779
7	1,002	18	2,065	29	4,004
8	1,073	19	2,198	30	4,241
9	1,148	20	2,339	31	4,491
10	1,228	21	2,488	32	4,753

3.6 Приклади розв'язання задач

Приклад 3.1. Визначити концентрацію SO_3 , температуру точки роси t_p і масовий викид SO_3 під час спалювання мазуту в паровому котлі при відносному навантаженні 1 і 0,5 від Q_n . В топці котла спалюється мазут з $Q_n^p = 38,44$ МДж/кг, $S^p = 2,2$ та витратою $B = 50$ кг/с. Коефіцієнт надлишку повітря 1,03. Теплова напруга об'єму топки $q_f = 8,79$ МВт/м². Для даного палива: $V_{пов}^0 = 10,2$ м³/кг, $V_r^0 = 10,99$ м³/кг.

Розв'язання

Дійсний об'єм димових газів, м³/кг

$$V_r = V_r^0 + (\alpha_T - 1) \cdot V_{пов}^0 = 10,99 + (1,02 - 1) \cdot 10,2 = 11,296.$$

Об'ємна частка діоксиду сірки

$$P_{SO_2} = 0,007 \cdot S^p / V_r = 0,007 \cdot 2,2 / 11,296 = 0,00136.$$

Вміст надлишкового кисню, %

$$O_2 = 21 \cdot (\alpha_T - 1) \cdot V^0 / V_r = 21 \cdot 0,03 \cdot 10,2 / 11,296 = 0,569.$$

Вміст SO₃ при номінальному навантаженні, %

$$\begin{aligned} \text{SO}_3 &= 0,424 \cdot P_{\text{so}_2} \cdot O_2^{0,5} \cdot q_f \cdot (Q / Q_H)^2 = \\ &= 0,424 \cdot 0,00136 \cdot 0,569^{0,5} \cdot 8,79 \cdot 1 = 0,0038. \end{aligned}$$

Те ж, при пониженому навантаженні котла, %

$$\text{SO}_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5^2 = 0,951 \cdot 10^{-3}.$$

Значення температури точки роси, °C:

- при номінальному навантаженні

$$t_p = 50 + 50 \cdot A_{\text{SO}_3}^{0,2} = 50 + 50 \cdot 38^{0,2} = 153,5,$$

- при навантаженні 0,5·Q_H

$$t_p = 50 + 11 \cdot A_{\text{SO}_3}^{0,7} = 50 + 11 \cdot 9,51^{0,7} = 103,2.$$

Масова концентрація SO₂ у відхідних газах при номінальному навантаженні, г/кг

$$\begin{aligned} g_{\text{so}_2} &= 2,86 \cdot 10^3 \cdot (P_{\text{so}_2} - 0,01 \cdot \text{SO}_3) \cdot V_r \cdot (\alpha_T / \alpha_{\text{BF}}) = \\ &= 2,86 \cdot 10^3 \cdot (0,00136 - 3,8 \cdot 10^{-5}) \cdot 11,296 \cdot (1,03 / 1,22) = 36,06. \end{aligned}$$

Масовий викид SO₂ у навколишнє середовище, г/с

$$M_{\text{SO}_2} = g_{\text{SO}_2} \cdot B = 36,06 \cdot 50 = 1802,9.$$

Приклад 3.2. Визначити валові викиди легкої золи та парникових газів в разі спалювання вугілля в котлі потужністю Q_к=2 МВт з ККД 86%. Частина винесення золи a_{вн}=0,6, характеристики палива: A^p=21,8%, S^p=3%, C^p=49,3%, H^p=3,6%, Q_H^p = 19,45 МДж/кг. На скільки зменшаться викиди золи, в разі встановлення зололовлювача з η_{зв} = 0,98?

Розв'язання

Витрата палива на котел, кг/с

$$B_p = \frac{Q_k}{Q_H^p \cdot \eta_k} = \frac{2}{19,45 \cdot 0,86} = 0,1196.$$

Валовий викид золи, кг/год

$$M_3 = 0,01 \cdot B_p \cdot a_{\text{вн}} \cdot A^p = 0,01 \cdot 0,1196 \cdot 0,6 \cdot 21,8 \cdot 3600 = 56,3.$$

Те ж, в разі встановлення золовловлювача, кг/год

$$\begin{aligned} M_3 &= 0,01 \cdot B_p \cdot a_{\text{вн}} \cdot A^p \cdot (1 - \eta_{\text{зв}}) = \\ &= 0,01 \cdot 0,1196 \cdot 0,6 \cdot 21,8 \cdot 3600 (1 - 0,98) = 1,126. \end{aligned}$$

Очікувані викиди парникових газів, кг/год

$$M_{\text{CO}_2} = 0,04 \cdot C^p \cdot B^p = 0,04 \cdot 49,3 \cdot 0,1196 \cdot 3600 = 849;$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,09 \cdot H^p \cdot B^p = 0,09 \cdot 3,6 \cdot 0,1196 \cdot 3600 = 139,5;$$

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot S^p \cdot B^p = 0,04 \cdot 3 \cdot 0,1196 \cdot 3600 = 51,67.$$

Приклад 3.3. Визначити очікуваний вихід оксидів азоту із котла при спалюванні природного газу з $Q_{\text{н}}^p = 34 \text{ МДж/м}^3$. Температура гарячого повітря $t_{\text{г.пов.}} = 370 \text{ }^\circ\text{C}$, фізична теплота повітря $Q_{\text{г.пов.}} = 4992 \text{ кДж/м}^3$, $\alpha_{\text{г}} = 1,1$, присмоктування холодного повітря в топку $\Delta\alpha_{\text{г}} = 0,1$; температура газів на виході з топки $t_{\text{г}}'' = 1210 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{г}}^0 = 11 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $V_{\text{пов.}}^0 = 9,94 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\psi_{\text{з.г.}} = 0,313$; $q_{\text{в}} = 0,149 \text{ МВт/м}^3$; $q_{\text{ф}} = 4,79 \text{ МВт/м}^2$; $\Pi = 50 \text{ м}$.

Розв'язання

Тепловиділення в зоні горіння, кДж/м^3

$$Q'_{\text{г}} = Q_{\text{н}}^p \cdot 10^3 + Q_{\text{г.в.}} + Q_{\text{пал}} = 34000 + 4992 = 38992.$$

$$\alpha_{\text{гор}} = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05.$$

Очікувана адіабатна температура горіння, $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{а}} = \frac{1950}{\alpha_{\text{гор}}} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} \cdot Q'_{\text{г}}) = \frac{1950}{1,05} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} \cdot 38992) = 2117,83.$$

Коефіцієнт

$$k_{\text{т}} = (t_{\text{а}} - 1200) / 1000 = (2117,83 - 1200) / 1000 = 0,9178.$$

Теплоємності газів і повітря, $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$

$$c_{\Gamma} = 1,57 + 0,122 \cdot k_t = 1,57 + 0,122 \cdot 0,9178 = 1,682,$$

$$c_{\text{пов}} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,9178 = 1,544.$$

Розрахункова адиабатна температура, К

$$\begin{aligned} T'_a &= \frac{Q'_{\Gamma}}{V_{\Gamma}^0 \cdot c_{\Gamma} + 1,016 \cdot (\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^0 \cdot c_{\text{пов}}} + 273 = \\ &= \frac{38992}{11 \cdot 1,682 + 1,016 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,94 \cdot 1,544} + 273 = 2295. \end{aligned}$$

Оскільки отримане значення температури відрізняється від t_a більше, ніж на $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, то приймаємо значення $t_a = T'_a - 273 = 2022 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і уточнимо значення теплоємностей газів і повітря.

$$k_t = (2022 - 1200) / 1000 = 0,822;$$

$$c_{\Gamma} = 1,57 + 0,122 \cdot 0,822 = 1,67 \text{ кДж}/(\text{м}^3\text{К});$$

$$c_{\text{пов}} = 1,46 + 0,092 \cdot 0,822 = 1,536 \text{ кДж}/(\text{м}^3\text{К});$$

$$T'_a = \frac{38992}{11 \cdot 1,67 + 1,016 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,94 \cdot 1,536} + 273 = 2309,6 \text{ К.}$$

Максимальна температура в зоні горіння, К

$$\begin{aligned} T_M &= \beta_{\text{ср}} \cdot T'_a \cdot (1 - \psi_{\text{з.г}})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+\text{nr}}) \cdot m_{\Gamma} = \\ &= 0,97 \cdot 2309,6 \cdot (1 - 0,313)^{0,25} = 2039,6. \end{aligned}$$

Максимальна температура з врахуванням поправки, К

$$T'_M = 1,01 \cdot T_M = 1,01 \cdot 2039,6 = 2060.$$

Температурний інтервал активної реакції утворення оксидів азоту, К

$$\Delta T_p = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}} = \frac{2060^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 2060 \cdot 10^{-5}} = 66,87.$$

Середня розрахункова температура газів в топковому об'ємі, К

$$\bar{T}_{\Gamma} = 0,84 \cdot \left[(T_M)^4 + (T'_T)^4 \right]^{0,25} = 0,84 \cdot \left[(2039,6)^4 + (1483_{\Gamma})^4 \right]^{0,25} = 1822.$$

Тривалість перебування газів в топковій камері, с

$$\tau_{\text{п}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \bar{T}_r \cdot v_r'' \cdot \alpha_r \cdot (1+r)} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,149 \cdot 1822 \cdot 0,3 \cdot 1,1 \cdot (1+0)} = 2,44.$$

Теоретичний час досягнення рівноважної концентрації оксиду азоту NO за температури реакції T_M , с

$$\tau_0 = 0,024 \cdot \exp(54290 / T_M - 23) = 0,024 \cdot \exp(54290 / 2060 - 23) = 0,687.$$

Концентрація надлишкового кисню в зоні реакції, кг/м³

$$\begin{aligned} C_{O_2} &= \frac{0,21 \cdot V_{\text{пов}}^0 \left[(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r \cdot (\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}}) \right] \cdot \rho_{O_2}}{[V_r^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^0] \cdot (1+r)} = \\ &= \frac{0,21 \cdot 9,94 \left[(1,05 - 1) \right] \cdot 1,428}{11 + (1,05 - 1) \cdot 9,94} = 0,013. \end{aligned}$$

Розрахункова тривалість реакції утворення оксидів азоту в топці, с

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_r} \left(\frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right) \cdot \tau_{\text{п}} = \frac{66,87}{2022 - 1483} \left(\frac{4,79 \cdot 50}{300} \right) \cdot 2,44 = 0,27.$$

Концентрація термічних оксидів азоту, утворених під час термічних реакцій в зоні ядра факела, г/м³

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{тп}} &= 7,03 \cdot 10^3 \cdot C_{O_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860 / T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0} = \\ &= 7,03 \cdot 10^3 \cdot 0,013^{0,5} \cdot \exp(-10860 / 2039,6) \frac{0,27}{0,687} = 1,53. \end{aligned}$$

Концентрація швидких оксидів азоту, г/м³

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{шв}} &= 0,1 \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1+r} \right)^2 \cdot \left(\frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33} = \\ &= 0,1 \cdot \left(\frac{1,05 + 0}{1+0} \right)^2 \cdot \left(\frac{2060 - 800}{1000} \right)^{0,33} = 0,119. \end{aligned}$$

Сумарний вихід оксидів азоту при спалюванні природного газу, г/м³

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{шв}} + \text{NO}_2^{\text{тп}} = 0,119 + 1,53 = 1,65.$$

Приклад 3.4. Визначити концентрацію діоксиду сірки біля поверхні землі для котельні, в якій встановлені два однакових котлоагрегати, які працюють на високосірчастому мазуті з таким складом: $C^p=83\%$, $H^p=10,4\%$, $S^p=2,8\%$, $N^p=0,9\%$, $O^p=0,7\%$, $A^p=0,1\%$, $W^p=3\%$, якщо відома висота димової труби $H=31$ м, розрахункова витрата палива $V_p=0,525$ кг/с, температура газів на вході в димову трубу $\vartheta_{д.т.}=186$ °С, на виході з димової труби $\vartheta'_{д.т.}=180$ °С, коефіцієнт надлишку повітря перед трубою $\alpha_{д.т.}=1,5$, температура навколишнього середовища $t_{н.с.}=20$ °С, коефіцієнт, що враховує швидкість осідання діоксиду сірки в атмосфері, $F=1$, коефіцієнт, що враховує умови виходу продуктів згорання з основи димової труби $m=0,9$, коефіцієнт стратифікації атмосфери $A=120$ с^{2/3}град^{1/3} і фонові концентрація забруднення атмосфери діоксидом сірки $C_{ф.}=0,03 \cdot 10^{-6}$ кг/м³, барометричний тиск повітря $h_{\sigma}=97 \cdot 10^3$ Па [9].

Розв'язання

Теоретично необхідний об'єм повітря, м³/кг

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,089 \cdot C^p + 0,266 \cdot H^p + 0,033 \cdot (S^p - O^p) = \\ &= 0,089 \cdot 83 + 0,266 \cdot 10,4 + 0,033 \cdot (2,8 - 0,7) = 10,2. \end{aligned}$$

Теоретичний об'єм продуктів повного згорання, м³/кг

$$\begin{aligned} V_r^0 &= 0,0187 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,79 \cdot V^0 + 0,8 \cdot N^p / 100 + \\ &+ 0,0124 \cdot (9H^p + W^p) + 0,0161 \cdot V^0 = 0,0187 \cdot (83 + 0,375 \cdot 2,8) + \\ &+ 0,79 \cdot 10,2 + 0,0124 \cdot (9 \cdot 10,4 + 3) + 0,0161 \cdot 10,2 = 10,99. \end{aligned}$$

Об'єм газів, що проходять через димову трубу, м³/с

$$\begin{aligned} V_{г.д.т.} &= n \cdot V_p \cdot [V_r^0 + (\alpha_{д.т.} - 1) \cdot V^0] \cdot \frac{\vartheta_{д.т.} + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_{\sigma}} = \\ &= 2 \cdot 0,525 \cdot [10,99 + (1,5 - 1) \cdot 10,2] \cdot \frac{180 + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{97 \cdot 10^3} = 29. \end{aligned}$$

Знайдемо масу діоксиду сірки, що викидається в атмосферу з димової труби, кг/с:

$$M = 0,01 \cdot n \cdot V_p \cdot S^p \cdot \frac{M_{SO_2}}{M_S} = 0,01 \cdot 2 \cdot 0,525 \cdot 2,8 \cdot \frac{64}{32} = 0,059.$$

Концентрацію оксиду сірки біля поверхні землі, кг/м^3 визначимо за формулою:

$$C = 0,001 \cdot \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_{\Gamma}^{\text{д.т.}} \cdot \Delta t}} + 2 \cdot C_{\phi} = 0,001 \cdot \frac{120 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot 0,9}{31^2 \cdot \sqrt[3]{29 \cdot (186 - 20)}} + 2 \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} = 0,45 \cdot 10^{-6}.$$

Приклад 3.5. Під час вимірювання концентрації шкідливих викидів у відхідних газах були зафіксовані такі значення показників: $O_2 = 7,8\%$, $P_b = 99,3$ кПа, $\Delta P = 0,004$ кПа, $t_b = 21$ °С, $t_g = 96$ °С, $C_{CO} = 23$ мг/м^3 , $C_{NOX} = 12$ мг/м^3 . Відбір проб виконувався приладом, не оснащеним осушенням газів.

Розв'язання

Визначимо: $P_{H_2O} = 2,488$ кПа.

Знайдемо коефіцієнт надлишку повітря:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 7,8} = 1,59.$$

Знайдемо концентрацію оксиду вуглецю (CO), мг/м^3 :

$$c_{CO} = \frac{c^{\text{meas}}}{\left(1 - \frac{P_{H_2O}}{P_b}\right)} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{101,3}{(P_b \pm \Delta P)} \cdot \frac{\alpha}{1,4} =$$

$$= \frac{23 \cdot (273 + 96) \cdot 101,3 \cdot 1,59}{(1 - 2,488 / 99,3) \cdot 273 \cdot (99,3 + 0,004) \cdot 1,4} = \frac{1366976}{37003} = 36,94.$$

Знайдемо концентрацію оксиду азоту (NO_2), мг/м^3 :

$$c_{NO_2} = \frac{c^{\text{meas}}}{\left(1 - \frac{P_{H_2O}}{P_b}\right)} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{101,3}{(P_b \pm \Delta P)} \cdot \frac{\alpha}{1,4} =$$

$$= \frac{12 \cdot (273 + 96) \cdot 101,3 \cdot 1,59}{(1 - 2,488 / 99,3) \cdot 273 \cdot (99,3 + 0,004) \cdot 1,4} = \frac{713205}{37003} = 19,27.$$

Приклад 3.6. Під час вимірювань концентрації шкідливих викидів у відхідних газах були зафіксовані такі значення показників: $O_2 = 8,3\%$, $P_b = 99,8$ кПа, $\Delta P = -0,003$ кПа, $t_b = 17$ °С, $t_g = 102$ °С, $C_{CO} = 34$ ppm, $C_{NOX} = 16$ ppm. Відбір проб виконувався приладом, оснащеним осушенням газів.

Розв'язання

Знайдемо коефіцієнт надлишку повітря:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 8,3} = 1,65.$$

Знайдемо концентрацію оксиду вуглецю (CO), мг/м³:

$$c_{\text{CO}} = I_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}} \cdot \frac{\alpha}{1,4} = \frac{34 \cdot 1,25 \cdot 1,65}{1,4} = 50,09.$$

Знайдемо концентрацію оксиду азоту (NO₂), мг/м³:

$$c_{\text{NO}_2} = I_{\text{NO}_2} \cdot \rho_{\text{NO}_2} \cdot \frac{\alpha}{1,4} = \frac{16 \cdot 2,05 \cdot 1,65}{1,4} = 38,66.$$

Приклад 3.7. Перерахувати дослідні дані, отримані для сухих газів, на стандартні умови для сухих газів, якщо відомо: $V_{\text{cr}}^0 = 7,53 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $V^0 = 8,26 \text{ м}^3/\text{м}^3$, коефіцієнт надлишку повітря в димових газах $\alpha = 1,3$, температура газів $t_r = 128 \text{ }^\circ\text{C}$, концентрації забруднювальних речовин: $C_{\text{VNO}_x} = 100 \text{ ppm}$, $C_{\text{mCO}} = 52 \text{ мг/м}^3$.

Розв'язання

Для перерахунку дослідних даних, отриманих для сухих газів, на стандартні умови ($C^{\text{ст.у.}}$) для сухих газів:

об'ємна концентрація, ppm (%)

$$C_{\text{VNO}_x}^{\text{ст.у.}} = C_{\text{VNO}_x} \cdot \frac{V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0} = 100 \cdot \frac{7,53 + (1,3 - 1) \cdot 8,26}{7,53 + (1,4 - 1) \cdot 8,26} = 92,37;$$

масова концентрація, мг/м³

$$\begin{aligned} C_{\text{mCO}}^{\text{ст.у.}} &= C_{\text{mCO}} \cdot \frac{273 + t_r}{273} \cdot \frac{P_0}{P_r} \cdot \frac{V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0}{V_{\text{с.г.}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V^0} = \\ &= 52 \cdot \frac{273 + 128}{273} \cdot \frac{101,3}{100} \cdot \frac{7,53 + (1,3 - 1) \cdot 8,26}{7,53 + (1,4 - 1) \cdot 8,26} = 71,47. \end{aligned}$$

Переведемо об'ємну концентрацію NO_x в масову

$$C_{\text{m}}^{\text{NO}_x} = C_{\text{VNO}_x}^{\text{ст.у.}} \cdot K_{\text{п}} = 92,37 \cdot 2,05 = 189,36 \text{ мг/м}^3.$$

Приклад 3.8. Визначити температуру точки роси при спалюванні в паровому котлі донецького газового палива, що має $Q_H^p = 18,88$ МДж/кг; $S^p = 3,5\%$; $A^p = 28,5$; частку виносу золи з газами прийняти $a_{\text{вин}} = 0,95$.

Розв'язання

Приведені значення сірчистості і зольності палива, %

$$S^n = S^p / Q_H^p = 3,5 / 18,88 = 0,185; A^n = A^p / Q_H^p = 28,5 / 18,88 = 1,51.$$

Температура точки роси при парціальному тиску водяної пари $P_{H_2O} = 0,009$ МПа становить

$$t_p = t_{\text{конд}} + \frac{202 \cdot (S^n)^{0,33}}{1,23^{a_{\text{вин}} \cdot A^n}} = 43 + \frac{202 \cdot 0,185^{0,33}}{1,23^{0,95 \cdot 1,51}} = 128,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приклад 3.9. Визначити викиди забруднювальних речовин у атмосферу в разі спалювання в енергетичній установці потужністю 10 МВт вугілля з таким складом, %: $W^p = 13$; $A^p = 21,8$; $S^p = 3$; $C^p = 49,3$; $H^p = 3,6$; $N^p = 1$; $O^p = 49,3$; $O^p = 8,3$. Теплота згорання палива $Q_H^p = 19453,35$ кДж/кг, ККД котла 87%. Тривалість роботи котла $\tau = 189$ діб. Технічний аналіз уловленої золи та шлаку показав, що масовий вміст горючих речовин у леткій золі $\Gamma_{\text{вин}} = 1,5\%$, а в шлаці $\Gamma_{\text{шл}} = 0,5\%$. В котлі використовується факельне спалювання палива та рідке шлаковидалення. Сірчоочисна та азотоочисна установки відсутні.

Розв'язання

При використанні вугілля потрібно розрахувати викиди оксидів сірки, вуглецю, твердих частинок, N_2O , CH_4 . Розрахунки виконуємо за методикою [4].

Витрата палива на сезон, т/сезон

$$B = \frac{Q_k}{Q_H^p \cdot \eta_k} \cdot \tau = \frac{10}{19,453 \cdot 0,87} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 189 \cdot 10^{-3} = 9649.$$

Узагальнений показник емісії оксидів азоту, г/ГДж

$$K_{NO_x} = (K_{NO_x})_0 \cdot f_n^z \cdot (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2 \cdot \beta),$$

де $z = 1,15$ для водогрійного котла, $f_n = 0,86$, f_n – ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи при низькому навантаженні; η_1 – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду; η_2 – ефективність вторинних (азотоочисної установки) заходів скорочення викиду; β – коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

$$K_{NO_x} = 250 \cdot 0,86^{1,15} (1 - 0,3) = 147,13.$$

Валовий викид оксидів азоту, т

$$E_{\text{NOx}} = 10^{-6} \cdot K_{\text{NOx}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} \cdot B = 10^{-6} \cdot 147,13 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 27,62.$$

Показник емісії оксидів сірки (у перерахунку на діоксид сірки SO_2), які надходять у атмосферу з димовими газами за проміжок часу τ , розраховується за формулою, г/ГДж

$$K_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}} \cdot \frac{2 \cdot S^{\text{p}}}{100} \cdot (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2 \cdot \beta),$$

де η_1 – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом; η_2 – ефективність очищення димових газів від оксидів сірки; β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у котлі η_1 становить 0,05 (факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням)

$$K_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{19,453} \cdot \frac{2 \cdot 3^{\text{p}}}{100} \cdot (1 - 0,05) = 2930.$$

Валові викиди SO_2 , т/сезон

$$E_{\text{SO}_2} = 10^{-6} \cdot K_{\text{SO}_2} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} \cdot B = 10^{-6} \cdot 2930 \cdot 19,453 \cdot 9649 \approx 550.$$

Показник емісії оксиду вуглецю $K_{\text{CO}}=11,4$ г/ГДж (табл. 3.4).

Валові викиди оксиду вуглецю CO , т/сезон

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} \cdot K_{\text{CO}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} \cdot B = 10^{-6} \cdot 11,4 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 2,14.$$

Показник емісії вуглекислого газу при спалюванні органічного палива, г/ГДж

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^{\text{p}}}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}} \cdot \epsilon_c.$$

У цьому прикладі при рідкому шлаковидаленні частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи $a_{\text{внн}}=0,8$. У котлі відбувається неповне згорання палива, у першу чергу через механічне недопалювання. Ступінь окислення вуглецю для робочої маси палива ϵ_c в енергетичній установці

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{A^p}{C^p} \cdot \left(a_{\text{вин}} \cdot \frac{\Gamma_{\text{вин}}}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} + (1 - a_{\text{вин}}) \cdot \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} \right);$$

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{21,8}{49,3} \cdot \left(0,8 \cdot \frac{1,5}{100 - 1,5} + (1 - 0,8) \cdot \frac{0,5}{100 - 0,5} \right) = 0,9942;$$

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{49,3}{100} \cdot \frac{10^6}{19,453} \cdot 0,9942 = 92385,86.$$

Валовий викид вуглекислого газу, т/сезон

$$E_{\text{CO}_2} = 10^{-6} \cdot K_{\text{CO}_2} \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot V = 10^{-6} \cdot 92385,86 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 17341.$$

Показник емісії твердих частинок, г/ГДж

$$K_{\text{тв}} = \frac{10^6}{Q_{\text{н}}^p} \cdot a_{\text{вин}} \cdot \frac{A^p}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} \cdot (1 - \eta_{\text{зу}}) + K_{\text{твс}}.$$

Сірководяжна установка відсутня, тому викиду твердих частинок сорбенту і продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки немає. Ефективність золоуловлювальної установки $\eta_{\text{зу}}$ за даними випробувань для цієї установки становить 0,98. Показник емісії твердих частинок

$$K_{\text{тв}} = \frac{10^6}{19,453} \cdot 0,8 \cdot \frac{21,8}{100 - 1,5} \cdot (1 - 0,98) = 182.$$

Валовий викид твердих частинок, т/сезон

$$E_{\text{тв}} = 10^{-6} \cdot K_{\text{тв}} \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot V = 10^{-6} \cdot 182 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 34,162.$$

Валовий викид оксиду діазоту N_2O під час спалювання вугілля розраховується за формулою

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 10^{-6} \cdot K_{\text{N}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot V = 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 0,263,$$

де $K_{\text{N}_2\text{O}} = 1,4$ г/ГДж – довідникова інформація [4].

Валовий викид метану, т/сезон

$$E_{\text{CH}_4} = 10^{-6} \cdot K_{\text{CH}_4} \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot V = 10^{-6} \cdot 1 \cdot 19,453 \cdot 9649 = 0,1877,$$

де $K_{\text{CH}_4} = 1$ – довідникова інформація [4].

Приклад 3.8. Визначити очікуваний вихід оксидів азоту з котла при спалюванні вугілля з рідким шлаковидаленням для таких даних: $Q_H^p = 20,47$ МДж/кг, температура гарячого повітря $t_{пов} = 384$ °С, надлишок повітря на виході з топки $\alpha_t = 1,15$, температура газів на виході з топки 1190 °С, теплова напруга перерізу $q_f = 4,86$ МВт/м², периметр топкової камери $\Pi = 51,9$ м. Об'єми продуктів згорання $V_r^0 = 6,28$ м³/кг, $V^0 = 5,83$ м³/кг; ентальпія гарячого повітря $I_{пов} = 2879$ кДж/кг, вологість палива $W^p = 8\%$, $\beta_{с.г.} = 0,95$, $q_v = 0,155$ МВт/м³.

Розв'язання

Очікувана адіабатна температура горіння палива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} \cdot (1 + 10^{-5} \cdot Q'_T) = \frac{1800}{1,1} \cdot (1 + 10^{-5} \cdot 23349) = 2018.$$

$$\alpha_{гор} = \alpha_t - 0,5 \cdot \Delta\alpha_t = 1,15 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,1.$$

Для визначення теплоємностей газів і повітря визначимо ряд величин

$$k_t = (t_a - 1200) / 1000 = (2018 - 1200) / 1000 = 0,818.$$

Приведена вологість

$$W^п = W^p / Q_H^p = 8 / 20,47 = 0,39.$$

Теплоємність газів, кДж/(м³·К)

$$c_r = (1,59 + 0,004 \cdot W^п) + 0,14 \cdot k_t =$$

$$= 1,59 + 0,004 \cdot 0,39 + 0,14 \cdot 0,818 = 1,706.$$

Теплоємність повітря за високих температур, кДж/(м³·К)

$$c_{пов} = 1,46 + 0,092 \cdot k_t = 1,46 + 0,092 \cdot 0,818 = 1,535.$$

Розрахункова адіабатна температура, К

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_r^0 \cdot c_r + 1,016 \cdot (\alpha_{гор} - 1) \cdot V_{пов}^0 \cdot c_v} + 273 =$$

$$= \frac{23349}{6,28 \cdot 1,706 + 1,016 \cdot (1,1 - 1) \cdot 5,83 \cdot 1,535} + 273 = 2283.$$

Умовний коефіцієнт забруднення футерованої частини екранів $\xi_{\text{ф}} = 0,22$; $\psi_{3,\text{г}} = 0,273$.

Максимальна температура зони горіння, К

$$T_{\text{м}} = \beta_{\text{сг}} \cdot T'_{\text{а}} \cdot (1 - \psi_{3,\text{г}})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+n,r}) \cdot m = \\ = 0,95 \cdot 2283 \cdot (1 - 0,273)^{0,25} = 2030.$$

Температурний інтервал реакції утворення оксидів азоту

$$\Delta T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{м}}^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_{\text{м}} \cdot 10^{-5}} = \frac{2030^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 2030 \cdot 10^{-5}} = 64,9.$$

Середня температура газів в топці

$$\bar{T}_{\text{г}} = 0,84 \cdot [(T_{\text{м}})^4 + (T''_{\text{г}})^4]^{0,25} = 0,84 \cdot [2030^4 + 1463^4]^{0,25} = 1810.$$

Розрахункова тривалість реакції в топці, с

$$\tau_{\text{переб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_{\text{в}} \cdot \bar{T}_{\text{г}} \cdot v''_{\text{г}} \cdot \alpha \cdot (1+r)} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1810 \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = 2,3.$$

Розрахунковий час реакції утворення оксидів азоту в топці

$$\tau_{\text{р}} = \frac{\Delta T_{\text{р}}}{T'_{\text{а}} - T''_{\text{г}}} \cdot \left(\frac{q_{\text{ф}} \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \cdot \tau_{\text{переб}} = \frac{64,9}{2283 - 1463} \cdot \left(\frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,3 = 0,164.$$

Теоретичний час досягнення рівноваги

$$\tau_0 = 0,024 \cdot \exp(54290 / T_{\text{м}} - 23) = 0,024 \cdot \exp(54290 / 2030 - 23) = 1,01.$$

Концентрація надлишкового кисню в зоні реакції, кг/м³

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 \cdot V_{\text{пов}}^0 \cdot [(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}})] \cdot \rho_{\text{O}_2}}{[V_{\text{г}}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1)V_{\text{пов}}^0] \cdot (1+r)} = \\ = \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025.$$

Концентрація термічних оксидів азоту, г/м³

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{TP}} &= 7,03 \cdot 10^3 \cdot C_{\text{O}_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860 / T_{\text{M}}) \cdot \frac{\tau_{\text{P}}}{\tau_0} = \\ &= 7,03 \cdot 10^3 \cdot 0,025^{0,5} \cdot \exp(-10860 / 2030) \cdot \frac{0,164}{1,01} = 0,84. \end{aligned}$$

Паливні і "швидкі" оксиди азоту (при вмісті $N^{\text{P}}=1\%$), г/м³

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{Пал}} &= (0,4 - 0,1 \cdot N^{\text{P}}) \cdot N^{\text{P}} \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left(\frac{2100 - T_{\text{M}}}{125} \right)^{0,33} = \\ &= (0,4 - 0,1 \cdot 1) \cdot 1 \cdot (1,1)^2 \cdot \left(\frac{2100 - 2030}{125} \right)^{0,33} = 0,3. \end{aligned}$$

Сумарний вихід оксидів азоту при рідкому шлаковидаленні, г/м³

$$\text{NO}_{2\Sigma} = \text{NO}_2^{\text{Пал}} + \text{NO}_2^{\text{TP}} = 0,3 + 0,844 = 1,14.$$

Приклад 3.9. Під час інструментального аналізу шкідливих речовин в димових газах котла були зафіксовані такі показники: $C_{\text{CO}}=100$ ppm, $C_{\text{NOx}}=300$ ppm, $O_2=6,6\%$. В котлі потужністю 500 кВт спалювався природний газ з $Q_{\text{H}}^{\text{P}}=33$ МДж/м³, температура димових газів за котлом 135 °С, ККД котла 91%, $V_{\text{CF}}=10,383$ м³/м³. Привести концентрації шкідливих речовин до нормальних умов, визначити валові викиди шкідливих речовин. Газоаналізатор оснащений приладами для осушування димових газів.

Розв'язання

Витрата палива на котел, м³/с

$$V_{\text{P}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{к}}} = \frac{0,5}{31 \cdot 0,91} = 0,01769 \text{ або } 59,94 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Коефіцієнт надлишку повітря в місці відбору проби

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} = \frac{21}{21 - 6,6} = 1,458.$$

Масова концентрація шкідливих речовин в димових газах приведена до $\alpha=1,4$, мг/м³

$$C_{\text{CO}}^{\text{m}} = C_{\text{CO}} \cdot K_{\text{H}}^{\text{CO}} \cdot \frac{\alpha}{1,4} = 100 \cdot 1,25 \cdot \frac{1,458}{1,4} = 130,18;$$

$$C_{\text{NOx}}^m = C_{\text{NOx}} \cdot K_{\text{п}}^{\text{NOx}} \cdot \frac{\alpha}{1,4} = 90 \cdot 2,05 \cdot \frac{1,458}{1,4} = 192.$$

Валові викиди шкідливих речовин, мг/с

$$M_{\text{CO}} = B \cdot C_{\text{CO}}^m \cdot V_{\text{г}} = 0,0177 \cdot 130,18 \cdot 10,383 = 23,92;$$

$$M_{\text{NOx}} = B \cdot C_{\text{CO}}^{\text{NOx}} \cdot V_{\text{г}} = 0,0177 \cdot 192 \cdot 10,383 = 35,29.$$

Питомий масовий викид, г/м³

$$m_{\text{NOx}} = C_{\text{NOx}}^m \cdot V_{\text{сг}} = 192 \cdot 10,383 \cdot 10^{-3} = 1,993.$$

$$m_{\text{CO}} = C_{\text{CO}}^m \cdot V_{\text{сг}} = 130,18 \cdot 10,383 \cdot 10^{-3} = 1,352.$$

Питомий масовий викид на одиницю маси умовного палива, г/кг у.п.

$$m_{\text{NOx}}^* = C_{\text{NOx}}^m \cdot V_{\text{сг}} = 192 \cdot 10,383 \cdot 10^{-3} = 1,993.$$

$$m_{\text{CO}}^* = C_{\text{CO}}^m \cdot V_{\text{сг}} = 130,18 \cdot 10,383 \cdot 10^{-3} = 1,352.$$

Питомі викиди на одиницю теплової енергії, мг/МДж

$$K_{\text{NOx}} = M_{\text{NOx}} / (B_{\text{п}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}) = 35,29 / (0,0177 \cdot 31) = 64,31;$$

$$K_{\text{CO}} = M_{\text{CO}} / (B_{\text{п}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}) = 23,92 / (0,0177 \cdot 31) = 43,59.$$

3.7 Завдання для самостійної роботи

Приклад 3.10. Для умов прикладу 3.3. визначити викиди оксидів азоту в разі рециркуляції димових газів в топку.

Передостання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
г, %	9	10	11	12	13	14	10,5	11,5	12,5	13,5
Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	6,5	5	3	6,5	5	3	6,5	5	3	6,5

Приклад 3.11. Перерахувати дослідні концентрації шкідливих речовин на стандартні умови: 1) дослідні дані отримані для сухих газів; 2) дослідні

дані отримані для мокрих газів. Склад палива взяти з таблиці 3.8. Тиск газів $P_r=97$ кПа.

Передостання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_{CO} , ppm	100	105	110	120	115	125	95	114	118	130
C_{NOx} , ppm	190	195	160	150	155	165	170	175	180	185
C_{SO_2} , ppm	200	210	220	240	250	260	270	280	290	300
Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_r , °C	150	155	160	165	157	169	172	181	185	162

Приклад 3.12. Визначити валові викиди забруднювальних речовин в разі спалювання в котлі вугілля (В) /мазуту (М) та дослідити вплив навантаження котла, а також первинних та вторинних заходів щодо зменшення викидів на сумарні викиди. Дані для розрахунків взяти з таблиць 3.7–3.8. Необхідну довідкову інформацію взяти з ГКД 34.02.305-2002 [4], а також додатків, наведених в навчальному посібнику. Проаналізувати отримані результати.

Таблиця 3.7 – Початкові дані для розрахунків

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Паливо	В	М	В	М	В	М	В	М	В	М
Витрата палива, $V \times 1000$, т	90	10	80	9	95	9	77	8	70	6

В таблиці 3.7 використані такі позначення: В – вугілля; М – мазут.

Таблиця 3.8 – Склад палива для розрахунків

№ варіанта	C^p	H^p	S^p	N^p	O^p	A^p	W^p
1	2	3	4	5	6	7	8
1	48,7	3,3	2,8	0,7	4,3	32,2	8
2	52,6	3,3	1	1,5	4,2	29,4	8
3	44,2	2,9	2,5	1,5	8,6	28,8	11,5
4	65	3,4	0,7	0,5	7	17,4	6
5	85,04	10,64	2,55	0,3	0,41	0,06	1
6	42,6	3,3	0,9	8	3,4	28,4	14
7	85,71	11	1,8	0,45	0,5	0,05	0,49
8	66	3,5	1,6	3,5	0,4	16,5	8,5
9	85,71	11	1,8	0,45	0,5	0,05	0,49
10	59,6	3,8	0,8	1,3	5,4	23,6	5,5
11	86	12,04	0,85	0,58	0,3	0,03	0,2
12	45	2,6	1,7	0,4	9,9	11,4	29
13	87	11,9	0,39	0,33	0,2	0,03	0,15
14	43,4	2,9	0,8	0,8	7	38,1	7
15	37,3	3,1	2	0,5	9,3	34,8	13

Технічний аналіз уловленої золи та шлаку показав, що масовий вміст горючих речовин у леткій золі $\Gamma_{\text{вин}}$ дорівнює 1,5%, а в шлаці $\Gamma_{\text{шл}}=0,5\%$. Вміст ванадію в мазуті 333,3 мг/кг. Ефективність золовловлювальної установки 0,985.

Приклад 3.13. Визначити очікувані викиди парникових газів в разі спалювання палива (табл. 3.8), якщо відомо: витрата палива V , тривалість роботи установки 189 діб. Використати матеріали пункту 3.4.7.

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Витрата палива V , т/добу	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23

Приклад 3.14. Визначити концентрацію діоксиду сірки біля поверхні землі для котельні, в якій встановлені два однакових котлоагрегати, які спалюють паливо зі складом (табл. 3.8), якщо відома висота димової труби $H=31$ м, розрахункова витрата палива $V_p=0,4$ кг/с, температура газів на вході в димову трубу $\vartheta_{\text{дг}}=186$ °С, на виході з димової труби $\vartheta'_{\text{д.т.}}=180$ °С, коефіцієнт надлишку повітря перед трубою $\alpha_{\text{д.т.}}=1,4$, температура навколишнього середовища $t_{\text{н.с.}}=20$ °С, коефіцієнт, що враховує швидкість осідання діоксиду сірки в атмосфері, $F=1$, коефіцієнт, що враховує умови виходу продуктів згорання з основи димової труби $m=0,9$, коефіцієнт стратифікації атмосфери $A=120 \text{ с}^{2/3} \text{ град}^{1/3}$ і фонові концентрація забруднення атмосфери діоксидом сірки $C_{\text{ф}}=0,03 \cdot 10^{-6}$ кг/м³, барометричний тиск повітря $h_6=97 \cdot 10^3$ Па.

Приклад 3.15. Визначити очікувані валові викиди забруднювальних речовин (оксидів азоту, оксиду діазоту, метану, ртуті, метану) у атмосферу в разі спалювання в енергетичній установці газу. За звітний період спалено V , тис. м³ газу. Склад палива взяти з таблиці 3.9. Методику розрахунку взяти з ГКД 34.02.305-2002 [4].

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Витрата палива V , тис. м ³	15	17	19	11	13	24	28	25	21	23
Варіант палива №	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

Таблиця 3.9 – Елементарний склад природного газу

Елементарний склад	CH ₄ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	C ₄ H ₁₀ , %	C ₅ H ₁₂ , %	CO ₂ , %	N ₂ , %	ρ , кг/м ³
№ 1	98,9	0,12	0,011	0,01	0	15	0,9	0,723
№ 2	94,29	2,8	0,73	0,15	0,03	3	1	0,764

Приклад 3.16. Під час інструментального аналізу шкідливих речовин в димових газах котла були зафіксовані такі показники: $C_{\text{co}}=60$ ppm, $C_{\text{NOx}} = 200$ ppm, $O_2=5\%$. В котлі потужністю Q кВт спалювався природний

газ (табл. 3.9), температура димових газів за котлом t_r , °C, ККД котла 92%. Привести концентрації шкідливих речовин до нормальних умов, визначити валові викиди шкідливих речовин. Газоаналізатор не оснащений приладами для осушування димових газів.

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q, кВт	150	200	250	300	400	450	500	550	600	650
Варіант палива №	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Передостання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
t_r , °C	120	125	130	135	140	145	120	125	130	135

Контрольні питання

1. Одиниці фізичних величин, що характеризують газоподібні компоненти продуктів згорання.
2. Визначення валового викиду сірчистого ангідриду SO_2 .
3. Визначення валового викиду золи.
4. Закономірності утворення NO_x .
5. Закономірності утворення SO_x .
6. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів оксидів азоту в разі спалювання природного газу.
7. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів оксидів азоту в разі спалювання твердого палива.
8. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів парникових газів в разі спалювання твердого палива.
9. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів бензопірену.
10. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів оксидів сірки.
11. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку викидів мазутної золи.
12. Як розраховуються питомі викиди на одиницю теплової енергії?
13. Як визначається концентрація забруднювальної речовини в масових одиницях при відборі газів на аналіз без осушування?
14. Як визначається концентрація забруднювальної речовини в масових одиницях при відборі газів на аналіз з осушуванням?
15. Що таке гранично допустима концентрація?
16. Наведіть класифікацію шкідливих викидів за мірою небезпеки.
17. Як визначити валові викиди вуглекислого газу?
18. Які особливості приведення концентрації шкідливих речовин до нормальних умов в разі оснащення газоаналізатора приладом для осушування димових газів?

19. Що таке специфічний показник емісії вуглецю?
20. Як визначити валові викиди водяної пари?
21. Як визначається концентрація забруднювальної речовини в об'ємних одиницях при відборі газів на аналіз без осушування?
22. Як визначається концентрація забруднювальної речовини в об'ємних одиницях при відборі газів на аналіз з осушуванням?
23. Що таке бензопірен?
24. Як визначається температура точки роси для твердого палива?
25. Як визначається температура точки роси для рідкого палива?
26. Наведіть формулу для визначення викидів монооксиду вуглецю (CO).
27. Особливості розрахунку оксидів азоту в разі спалювання природного газу.

4 МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ З ВІДХІДНИМИ ГАЗАМИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

4.1 Очищення продуктів горіння від газоподібних токсичних викидів

Проблема шкідливих викидів при спалюванні органічних палив вирішується поетапно на різних стадіях технологічного процесу в котельнях і ТЕС, починаючи зі стадії підготовки палива до спалювання, далі на стадії спалювання палива і, нарешті, в процесі охолодження продуктів горіння палива. На стадії підготовки палива до спалювання можливе отримання "чистого" палива, високотемпературне підігрівання мазуту, термічне підготування вугільного пилу, приготування водовугільних суспензій. Отримання "чистого" палива шляхом десульфуризації досягається за рахунок видалення сірки з палива [6].

Процес газифікації твердого чи рідкого палива полягає у неповному окисленні органічної частини палива різними газоподібними окислювачами за високих температур (90–1300 °С) з утворенням генераторного газу, що містить в основному CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂. Побічними продуктами газифікації є зола, H₂S, NH₃, смоли, які повинні бути відділені, після чого генераторний газ може розглядатися як "чисте" енергетичне паливо. Використання очищеного генераторного газу дозволяє знизити викиди NO_x до 10 разів.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що вихід оксидів азоту NO залежить від температури підігріву мазуту. При підвищенні температури від 130 до 170 °С вихід NO_x збільшується на 20%, подальше підвищення температури до 250 °С призводить до зменшення викидів NO_x на 40–50%.

Під час прогріву вугільного пилу у відновлювальному середовищі при $\alpha=0,02-0,03$ і температурі 500–700 °С відбувається руйнування азотовмісних компонентів палива і перехід в летку частину речовин типу HCN і NH₃, із яких потім за відсутності кисню утворюється молекулярний азот N₂. Для реалізації цього методу розроблені спеціальні пальники з попереднім підігрівом вугільного пилу до 500–700 °С, при експлуатації яких досягається зниження викидів оксидів азоту в 2–2,5 рази.

Інтерес викликають також водовугільні суспензії (ВВС) – штучно обводнене (до $W^p=33-40\%$) подрібнене (від 0 до 20 мкм) вугілля, що транспортується по трубопроводах і призначене для прямого спалювання в топках котлів. Подача ВВС в топку виконується за допомогою форсунок в середовищі зжатого повітря. Викиди оксидів азоту знижуються при цьому на 25–30%, але ККД котла знижується на 2–4%.

4.2 Методи зниження утворення оксидів азоту

Оксиди азоту найбільше утворюються у високотемпературній зоні газового факела, тому стримування їхньої емісії пов'язано з інтенсивним охолодженням зони горіння чи зменшенням температури в ній за рахунок рециркуляції баластових мас (димових газів). Основними шляхами зниження викидів NO_x на стадії спалювання палива, що призводять до стримування їхнього утворення, є двоступеневе спалювання палива; рециркуляція продуктів горіння; вприскування води чи введення пари у факел; застосування спеціальних пальникових пристроїв; вибір оптимального коефіцієнта надлишку повітря.

Рециркуляція газів в топкову камеру на даний час широко застосовується в котельній техніці. Димові гази з температурою 300–400 °С відбираються перед повітропідігрівником і спеціальним рециркуляційним насосом подаються в топку. Температура факела знижується на 120–130 °С. Введення рециркуляційних газів в топку призводить до малого зниження ККД: 0,1–0,3% на 1% рециркуляційних газів. Найбільш ефективна рециркуляція газів з паливом (в 1,8 рази більше, ніж з повітрям). При рециркуляції 20% продуктів горіння з паливом зниження викидів NO_x становить 90%.

Двостадійне спалювання палива. При двостадійному спалюванні в первинну зону горіння повітря подається менше, ніж теоретично необхідно ($\alpha=0,8-0,95$). В результаті відбувається неповне згорання палива з частковою його газифікацією за пониженої температури. У вторинну зону подається чисте повітря чи збіднена паливом суміш для допалювання продуктів неповного згорання. Цей метод дозволяє знизити NO_x на 25–35%.

Таке спалювання палива є дешевим, надійним та практично універсальним методом зниження виходу оксидів азоту при спалюванні газу, мазуту та вугілля.

Стадійний процес може бути організований шляхом подавання повітря в окремі пальники (чи ряди пальників) з нестачею повітря, а в пальники, розташовані вище, з надлишком повітря або створенням спеціальних пальників двостадійного спалювання палива.

Під час **вприскування** води (витрата води 0,35 кг/м³ палива) чи введенні пари (3–3,5% маси повітря) в факел досягається зниження NO_x в 2 рази. Як вприскувана вода може використовуватись: технічна вода; насичена пара; вода безперервної продувки; замазучені води.

Крім зниження NO_x в продуктах горіння знижується вміст бензопірену. Ефекти при введенні водяних парів зводяться до зниження максимуму температури горіння. Переваги методу – невеликі конструктивні і експлуатаційні затрати, а також його простота і легкість автоматизації. Недоліки методу – зниження ККД котла на 0,5–1,3% через втрати з відхідними газа-

ми і підвищення інтенсивності низькотемпературних сірчано-кислотної і кисневої корозій поверхонь нагріву.

Застосування **спеціальних плоскополуменевих** пальникових пристроїв з внутрішньою рециркуляцією газів, що мають температуру 800–1200 °С, до фронту запалення дозволяє на 40–50% знизити викиди оксидів азоту.

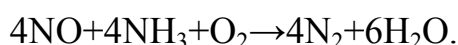
Суттєвий вплив на вихід NO_x має величина *коефіцієнта надлишку повітря*. Зміною режимних параметрів роботи пальників досягають суттєвого зниження викидів оксидів азоту. За температури в зоні горіння 1600–1700 °С максимальний вміст оксидів азоту має місце при $\alpha=1,2$ і при зменшенні його до 1,02 вдається знизити вміст оксидів азоту в 2 рази.

Вихід оксидів азоту NO залежить від температури підігріву мазуту. За підвищення температури від 130 до 170 °С вихід NO_x збільшується майже на 20%, подальший підігрів до температури 250 °С призводить до зменшення виходу NO_x на 40–50%.

4.2.1 Відновлення оксидів азоту продуктів горіння палива

Зниження вмісту оксидів азоту у викидах на стадії охолодження продуктів горіння виконується за допомогою методів, основаних на відновленні NO_x до молекулярного азоту N_2 . Відносно недорогим є метод селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту різними азотовмісткими речовинами за високих температур. Як відновлювачі використовуються: аміак NH_3 , мочевина (карбамід) $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, ціанурова кислота $(\text{HOCN})_3$. Термін "селективний" означає властивість вибіркового протікання реакцій речовини відновника з оксидами азоту порівняно з іншими компонентами димових газів.

Відновлення монооксиду азоту NO до N_2 за допомогою аміаку NH_3 протікає найбільш ефективно в діапазоні температур 870–1100 °С в присутності надлишкового кисню за реакцією



Відновлювач в методі СНКВ вводиться в потік димових газів через систему охолоджуваних інжекторів, які розташовані на виході з топки і всередині газоходів в необхідній температурній зоні (як правило між ширмовим і конвективним пароперегрівниками). Міра зниження оксидів азоту при використанні методу СНКВ становить 60–70%.

Метод селективного каталітичного відновлення (СКВ) оксидів азоту оснований на реакції відновлення NO_x аміаком на поверхні каталізатора в присутності кисню за температури газів 300–400 °С. Реакція відновлення NO_x має вигляд як і в методі СНКВ.

В методі СКВ передбачено використання каталітичного реактора, в активній зоні якого в декілька рядів розміщуються модулі з каталітичними

елементами. Активна маса каталізатора виконана на основі діоксиду титану TiO_2 , пентаоксиду ванадію V_2O_5 з домішками триоксидів вольфраму WO_3 чи молібдену MO_3 . Порошковий матеріал каталізатора закріплюється на поверхні металевого чи керамічного носія. Термін служби каталізатора 2–3,5 роки. Каталітичні реактори розміщують в розсічку між водяним економайзером і повітропідігрівником або після золотловлювача, але при цьому необхідний підігрів димових газів до необхідної температури. Метод СКВ є досить ефективним (зниження вмісту NO_x на 90%), але і дорогим методом відновлення оксидів азоту. На частку вартості каталізаторів припадає 50% вартості всієї установки СКВ, а їхня загальна маса становить декілька сотень тон.

4.3 Методи стримування утворення оксиду вуглецю

Оксид вуглецю CO – високотоксична речовина, яка добре реагує з гемоглобіном, що призводить до отруєння організму. Вміст CO в крові мешканців великих міст та промислових центрів в 3–9 разів перевищує нормальну концентрацію.

Приблизно 95% всіх утворених CO належить до промислових, серед яких енергетика становить менше 50%. Найбільші викиди супроводжують роботу бензинових та дизельних двигунів і підприємств чорної металургії. CO є продуктом неповного згорання.

Умови виникнення: недостатньо окислювача; зниження температури в реакційній зоні.

Подібні умови можуть виникати при надто великій мірі екранування топки, при малому об'ємі топки, при надто великому коефіцієнті надлишку повітря, при невдалому розташуванні пальників.

Зменшення викидів CO досягається покращенням сумішоутворення та рівномірним розподіленням температур в топці. Потрібно відзначити, що більшість методів приглушення утворення NO_x , що ґрунтується на зменшенні температури в топці (підвищення тепловіддачі, рециркуляція) призводять до підвищення концентрації CO у відхідних газах. Винятком є методи вприскування води і пари, оскільки введення додаткової кількості H_2O призводить до утворення надлишкових радикалів OH і покращення окислення CO.

4.4 Очищення продуктів горіння від механічних домішок

Для очищення продуктів горіння, що викидаються в атмосферу, і захисту робочих колес димососів від виносу (леткої золи і частинок незгорілого палива) в промислових і опалювальних котельнях, на ТЕС при спалюванні твердого палива встановлюються золотловлювачі. Вміст частинок золи і палива, що не згоріло в продуктах згорання, залежить від виду і ха-

рактеристики палива, способів пилопідготовки, спалювання і конструкції топки.

Золовловлювачі, що застосовуються в енергетиці, поділяють на такі групи:

- 1) механічні сухі золовловлювачі, в яких частинки золи видаляються із газу під дією центробіжних чи інерційних сил (рис. 4.1, рис. 4.2);
- 2) мокрі золовловлювачі, в яких частинки золи вловлюються із газу промиванням чи зрошенням його водою з наступним осадженням частинок золи на змочуваних поверхнях чи вловлюванням частинок на водяній плівці;
- 3) електрофільтри, в яких частинки золи вловлюються осадженням їх на електродах під дією електричних сил; електрофільтри є універсальними і досить ефективними золовловлювачами (ККД очищення становить 96–97%), що працюють в умовах підвищених температур (до 250 °С).

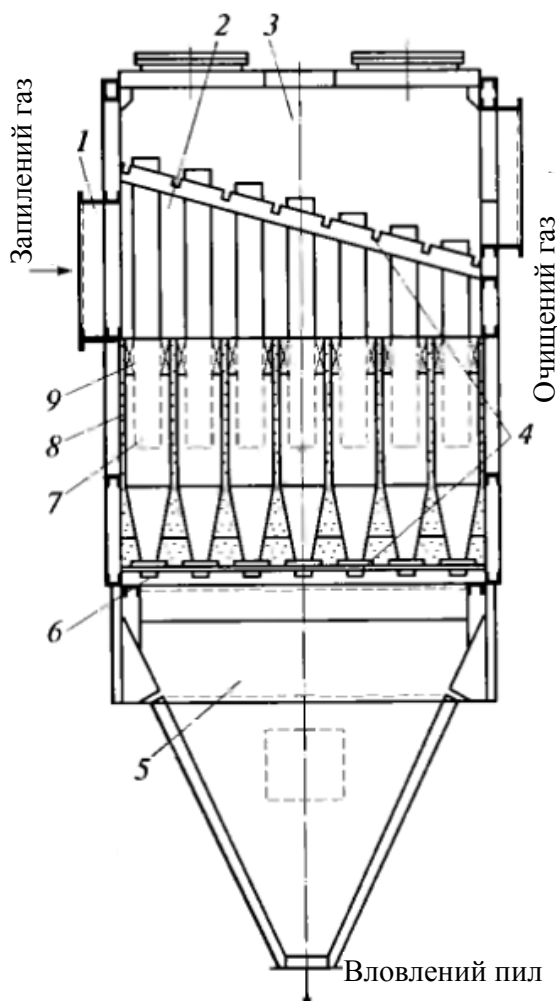


Рисунок 4.1 – Схема батарейного циклона: 1 – вхідний патрубок; 2 – розподільна камера; 3 – камера очищеного газу; 4 – опорні решітки; 5 – збірний бункер; 6 – отвори для відведення пилу; 7 – вихлопні труби; 8 – циклонні елементи; 9 – напрямні апарати

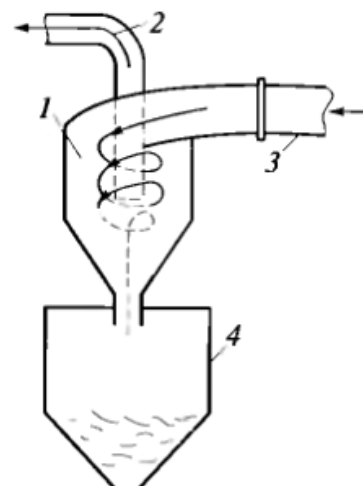


Рисунок 4.2 – Схема роботи циклона конструкції НДЮгазу: 1 – корпус циклона; 1 – труба для видалення чистих газів; 3 – патрубок входу димових газів; 4 – бункер для збору золи

Визначальними параметрами при виборі типу золовловлювача є повний і фракційний ККД. Повним ККД золовловлювача η , %, називають відношення зловленої в пиловловлювачі маси виносу $G_{зл}$, кг, до маси виносу на вході в

пиловловлювач, $G_{\text{вх}}$, кг. Фракційним ККД золовловлювача $\eta_{\text{ф}}$, %, називають відношення масового вмісту у виносі вловленої фракції $G_{\text{фр.вл}}$ до масового вмісту тієї ж фракції у виносі на вході в золовловлювач, $G_{\text{ф.вх}}$.

4.5 Методи стримування утворення оксидів сірки

Приблизно 50% всіх **оксидів сірки** (SO_2 , SO_3) утворюються при спалюванні палива, в металургії та нафтопереробці, а збитки від таких шкідливих викидів становлять приблизно 55% від загальних збитків від забруднення атмосфери. Сірка в твердих паливах міститься в трьох видах. Органічна сірка $S_{\text{орг}}$ входить в склад складних високомолекулярних органічних сполук палива. Колчеданна сірка є сполукою з металами (FeS_2) і входить в мінеральну частину палива у вигляді сульфатів лужних сполук металів (CaSO_4 і MgSO_4), в процесі горіння вона не окисляється і переходить в золу.

Колчеданна сірка видаляється із вугілля після його подрібнення гравітаційною чи магнітною сепарацією, а також методом пінної флотації. При гравітаційній сепарації відділення колчедану від вугілля ґрунтоване на різниці густин (густина колчедану $4,85\text{--}5,1 \text{ г/см}^3$, вугілля – $1,9\text{--}2 \text{ г/см}^3$). Видалення колчеданної і органічної сірки виконується гідротермічним методом шляхом взаємодії подрібненого палива з водяними розчинами лугів в автоклавах при тиску $1,75 \text{ МПа}$ і температурі $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Отримане при цьому вугілля з низьким вмістом сірки відділяється від рідини центрифугуванням, а потім осушується.

Органічну сірку з вугілля видаляють термічним або хімічним методами. В хімічних методах відбувається реагування подрібненого вугілля з розчинниками, а саме водними розчинами лугів ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH) за підвищених температур – $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$. Розроблений фірмою TWR (США) метод Gravimelt, що ґрунтований на хімічних методах, дозволяє зменшити загальну кількість сірки на 90%, а зольність палива на 95%.

Зниження сірки в рідких паливах відбувається за допомогою *прямого і непрямого методів*. За *прямого методу* сіркоочищення нафти відбувається процес гідрогенізації в присутності кобальт-молібденового каталізатора за температури $250\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску $1,4\text{--}10 \text{ МПа}$. В ході каталітичних реакцій відбувається розпадання сірковмісних органічних сполук з утворенням газоподібного сірководню. Останній відділяється і відновлюється до елементарної сірки. Ефективність методу – $80\text{--}98\%$. Недолік – вартість палива збільшується на 50%.

Непрямий метод сіркоочищення полягає в попередній вакуумній перегонці, в результаті якої відділяється частина більш важких нафтових залишків. Потім більш легкі фракції вивільнюються від сірки в процесі гідрогенізації в присутності каталізатора і знову змішуються із всією кількістю

чи частиною важких залишків. В результаті отримується рідке паливо з більш низьким вмістом сірки (0,6–1%).

При контакті з водяними парами в атмосфері SO_2 та SO_3 утворюють сірчану та сірчисту кислоту, що спричиняє погіршення здоров'я людини, зниження прозорості атмосфери, руйнування сталевих конструкцій, зменшення врожайності сільськогосподарських культур.

Концентрація SO_x у відхідних газах повністю залежить від вмісту в паливі сірки, при спалюванні рідкого палива практично вся сірка переходить в SO_x .

Інші методи боротьби із SO_x : відбракування палива; вапняковий метод (зрошення димових газів вапняковим молоком в скруберах); зв'язування сірки шляхом вдування в топку порошку доломіту ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$).

Контрольні питання

1. Назвіть основні методи зниження токсичних газоподібних викидів на стадії підготовки палива до спалювання.
2. Назвіть методи стримування утворення оксидів азоту, що використовуються в котельній техніці.
3. В чому суть методів відновлення оксидів азоту продуктів горіння палива (СНКВ і СКВ) і яка їхня ефективність?
4. Які шкідливі домішки знаходяться в продуктах горіння органічних палив?
5. До яких негативних наслідків призводить наявність в продуктах горіння шкідливих домішок?
6. Які види оксидів азоту утворюються при спалюванні палив?
7. Які ви знаєте види норм викидів шкідливих речовин в атмосферу?
8. Механічні сухі зололовлювачі. Принцип дії.
9. Мокрі зололовлювачі. Принцип дії.
10. Електрофільтри. Принцип дії.
11. Методи стримування утворення оксидів сірки.
12. Методи стримування утворення оксиду вуглецю.
13. Назвіть хімічні методи очистки димових газів від азоту.
14. Назвіть методи стримування утворення оксидів азоту.
15. Як може бути організоване двостадійне спалювання палива?
16. Назвіть методи боротьби з бензопіреном.
17. Назвіть переваги і недоліки методу зниження NO_x шляхом вприскування води в зону горіння.
18. Назвіть суть хімічних методів зниження вмісту сірки в паливі.
19. Які методи застосовують для зниження вмісту сірки в рідких паливах?
20. Як видаляється з вугілля колчеданна сірка?

5 ШКІДЛИВІ ВИКИДИ ВІД ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ТА МЕТОДИ ЇХНЬОГО ВИЗНАЧЕННЯ

Газотурбінні установки (ГТУ) належать до класу теплових двигунів, в основі робочого процесу яких лежить спалювання палива. В зв'язку з цим їхній розвиток і розповсюджене застосування супроводжуються як зростанням споживання палива, так і збільшенням масштабів забруднення атмосфери димовими газами. Продукти згорання від ГТУ містять: продукти повного згорання, компоненти неповного згорання палива, окисли азоту, золові частинки.

5.1 Шкідливі викиди від газотурбінних установок

Продукти згорання застосовуваних в ГТУ рідких і газоподібних палив можуть містити:

- продукти повного згорання (CO_2 , H_2O , окиси сірки SO_2 , SO_3);
- компоненти неповного згорання (сажа C , окис вуглецю CO , різні вуглеводні C_mH_n);
- окиси азоту (основними є NO , NO_2);
- золові частинки, що утворюються із негорючих домішок.

Негативний вплив на навколишнє середовище мають також шум, теплові викиди.

Про негативний вплив на навколишнє середовище наведених вище шкідливих речовин вказано в 2 розділі. Зупинимось лише на деяких особливостях.

Газові викиди ГТУ відрізняються від димових газів інших теплових двигунів і промислового паливоспалювального обладнання тим, що в них продукти згорання сильно розбавлені надлишковим повітрям. Коефіцієнт надлишку повітря у вихлопних газах ГТУ

$$\alpha_0 = G_{\text{пов}} / (G_{\text{пал}} \cdot L_0), \quad (5.1)$$

де $G_{\text{пов}}$, $G_{\text{пал}}$ – секундні витрати повітря і палива, L_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згорання.

L_0 досягає 3–6 на номінальному режимі і ще більш високих значень – на частковому навантаженні. Це веде до того, що реальні концентрації токсичних речовин у димових газах ГТД і ГТУ завжди суттєво нижчі, ніж в димових газах поршневого двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Розбавлення повітрям полегшує подальше розсіювання димових газів ГТУ в атмосфері до необхідних санітарно-гігієнічних норм, не потребуючи високих димових труб. Однак зазначені вище обставини не зменшують загального забруднення атмосфери.

5.1.1 Газоподібні продукти згорання палива і заходи щодо їхнього зменшення

Механізм утворення оксидів азоту для ГТУ такий же як і для котельних установок. Боротьба з утворенням оксидів азоту паливного походження ускладнена, єдиною практично доцільною мірою зниження їхньої концентрації у відхідних газах ГТУ є обмеження вмісту азоту в паливі. В традиційних газотурбінних паливах вміст азоту незначний, тому основна частка викидів припадає на оксиди азоту "повітряного" (термічного) походження. Є два напрямки вирішення цієї задачі: зниження температури в первинній зоні камери згорання; зменшення часу перебування газів в зоні високих температур.

Для зменшення викидів оксидів азоту в умовах роботи ГТУ застосовують такі прийоми:

- збільшення коефіцієнта надлишку первинного повітря;
- інтенсифікація сумішоутворення в камері згорання;
- застосування гомогенних камер згорання;
- застосування камер згорання із змінною геометрією;
- стадійна організація процесу горіння;
- застосування гібридних камер згорання;
- застосування камер згорання струменево-стабілізаційного типу;
- застосування каталітичних камер згорання;
- інтенсифікація відведення теплоти із зони реакції;
- рециркуляція продуктів згорання;
- подавання в зону горіння води або пари;
- модифікація палив ГТУ.

Більш детально з даними методами можна ознайомитись в [7].

5.2 Теплові викиди ГТУ та методи їхнього зменшення

В ГТУ, як і в інших теплових двигунах, не вся підведена в циклі теплота перетворюється в корисну потужність. Основною складовою теплових викидів в атмосферу є теплота відхідних газів ГТУ. Температура відхідних газів ГТУ може сягати 700 К і більше. Втрати теплоти з ними можуть сягати 58–62% від теплоти спалюваного палива.

Для зниження втрат теплоти застосовують регенерацію теплоти шляхом часткової утилізації теплоти відхідних газів з турбіни. Регенерація відбувається шляхом підігрівання повітря, що надходить в камеру згорання.

Розповсюдженим способом використання утилізованого тепла відхідних газів ГТУ є теплофікація. В цьому випадку на вихлопі ГТУ встановлюють мережні підігрівники, що дозволяють досить глибоко охолодити відхідні гази. При цьому коефіцієнт використання палива може сягати 74–78%.

5.3 Шум ГТУ і міри щодо його зменшення

Основними джерелами шуму ГТУ в навколишнє середовище є: всмоктувальний патрубок компресора, вихлопний патрубок турбіни, корпус ГТУ та її агрегатів.

Одним із основних джерел шуму на вихлопі є витічний струмінь продуктів згорання, який створює шум в процесі його турбулентного змішування з навколишнім середовищем.

Шум корпусу утворюється агрегатами: компресором, турбіною, камерами згорання, редукторами, регулювальними клапанами, насосами і тому може бути як механічного, так і газодинамічного походження. Рівень шуму може сягати 130–140 дБ. Зменшення шуму ГТУ в навколишнє середовище можливе таким чином: зменшенням рівня шуму безпосередньо у внутрішніх джерелах його утворення; ізоляцією і глушенням шуму, що випромінюється назовні через зовнішні джерела (випромінювачі) (всмоктування, вихлопування, корпус ГТУ). При цьому необхідно знати природу і причини, що генерують шум. Більш детально із способами зменшення шумності компресора і турбіни можна ознайомитись в [7].

5.4 Розрахунок викидів оксидів азоту від газотурбінних установок

Сумарна кількість оксидів азоту NO_x в перерахунку на NO_2 , що надходять в атмосферу з відпрацьованими газами ГТУ, M_{NO_2} , г/с або т, визначається з рівняння

$$M_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_{\text{cr}} \cdot B \cdot k_{\text{п}}, \quad (5.2)$$

де C_{NO_2} – концентрація оксидів азоту у відпрацьованих газах в перерахунку на NO_2 , мг/м^3 (визначається експериментально або приймається за табл. 5.1); V_{cr} – об'єм сухих газів за турбіною, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$), визначається за формулою

$$V_{\text{cr}} = (V_{\text{r}}^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0) + (\alpha_{\text{в}} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^0, \quad (5.3)$$

де $\alpha_{\text{в}}$ – коефіцієнт надлишку повітря у відпрацьованих газах за турбіною; B – витрата палива в камері згорання, т/год (тис. $\text{м}^3/\text{год}$, т, тис. м^3), при визначенні викидів в г/с B береться в т/год (тис. $\text{м}^3/\text{год}$); при визначенні викидів в тоннах B береться в тоннах (тис. м^3); $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт перерахунку, $k_{\text{п}}=0,278 \cdot 10^{-3}$ – при визначенні викидів в грамах в секунду, $k_{\text{п}}=10^6$ при визначенні викидів в тоннах.

При використанні в енергетичних ГТУ високофорсованих камер згорання з послідовним введенням повітря в зону горіння і мікрофакельних

камер згорання з подаванням всього повітря через фронтний пристрій масова концентрація оксидів азоту C_{NO_2} , мг/м³ визначається за формулою

$$C_{NO_2} = a \cdot k_t \cdot k_p \cdot 10^3, \quad (5.4)$$

де a – коефіцієнт, що залежить від палива: для високофорсованих камер згорання під час спалювання природного газу $a=1,8$, для газотурбінного і дизельного палив $a=2,4$; для мікрофакельних камер згорання під час спалювання природного газу $a=6,2$, для газотурбінного і дизельного палив $a=7,7$; k_t – коефіцієнт, що відображає вплив температури газів перед турбіною $T_{г.т.}$ – на утворення NO_x ; k_p – коефіцієнт, що відображає залежність концентрації оксидів азоту від тиску в камері згорання

$$k_p = \frac{16 \cdot p_{пов} - 0,23}{6 \cdot p_{пов} - 0,77}, \quad (5.5)$$

де $p_{пов}$ – тиск повітря перед камерою згорання, МПа.

Для високофорсованих камер згорання формула (5.5) застосовується для режимів, близьких до робочих, а для мікрофакельних – в широкому діапазоні зміни режимних параметрів: $\alpha_B=3-8$, $T_{пов}=200-350$ °С.

Ефективним способом зниження концентрації оксидів азоту у відхідних газах енергетичних ГТУ без корінної зміни конструкції камери згорання є вприскування води чи пари в зону горіння.

Зниження масової концентрації оксидів азоту при подаванні вологи в зону горіння:

$$C_{NO_2} = C_{NO_2}^{сух} / k_{вл}, \quad (5.6)$$

де C_{NO_2} , $C_{NO_2}^{сух}$ – концентрація оксидів азоту відповідно при подаванні вологи і без неї, мг/м³; $k_{вл}$ – коефіцієнт, що враховує вплив витрати вологи залежно від відношення кількості введеної вологи $G_{вл}$ до витрати палива B .

Для порівняння концентрації NO_x в продуктах згорання різних ГТУ за діючими вітчизняними і зарубіжними нормативно-технічними документами приводять до концентрації кисню $O_2=15\%$ за формулою

$$C_{NO_2}^* = C_{NO_2} \cdot \frac{21-15}{21-O_2}, \quad (5.7)$$

де $C_{NO_2}^*$, C_{NO_2} – приведена і дійсна концентрація оксидів азоту, мг/м³; O_2 – фактичне значення концентрації кисню в продуктах згорання ГТУ, %.

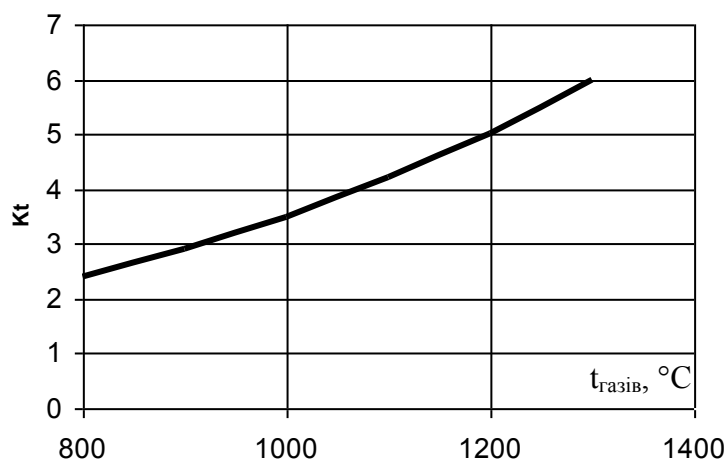


Рисунок 5.1 – Залежність коефіцієнта k_t від температури газів перед турбіною для мікрофакельних камер згорання

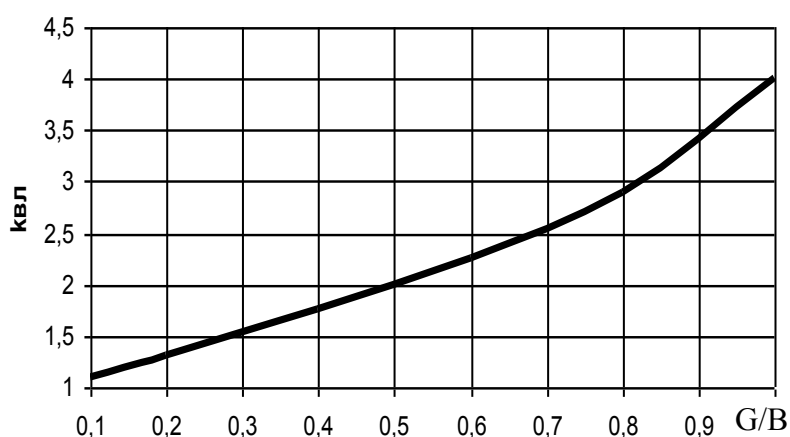


Рисунок 5.2 – Залежність коефіцієнта $k_{\text{вл}}$ від відносної витрати вологи G/B (пари чи води) в камері згорання

Таблиця 5.1 – Характеристики ГТУ

Тип ГТУ (завод)	Тип камери згорання	Вид палива	α_v	Об'ємна концентрація O_2 в продуктах згорання, %	Масова концентрація оксидів азоту, C_{NO_2} , мг/м^3	
					Камера згорання без вдосконалень	Камера згорання зміненої концентрації
1	2	3	4	5	6	7
ГТ-100-750 (ЛМЗ)	Регістрова, блокова	газотурбінне	4,1	15,9	275	
ГТ-35-770 (ХТЗ)	Регістрова, виносна	газ	4,6	16,4	225	
		газотурбінне	4,7	16,5	200	
ГТ-25-770-П (ЛМЗ)	Регістрова, виносна	газ	5,5	17	135	

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
ГТГ-12 (НПО "Машпроект")	Високофорсована, блокова	дизельне	5,1	16,9	190	
ГТН-25 (НЗЛ)	Мікрофакельна, кільцева	газ	4,1	15,9	58	
ГТЭ-150 (ЛМЗ)	Високофорсована, блокова	газ	3,5	15	220	150
		газотурбінне	3,5	15	270	210
ГТЭ-45 (ХТЗ)	Регістрова, кільцева	газ	4	15,8	220	100
		дизельне	4	15,8	240	150

Примітка. ЛМЗ – Ленінградський завод металевих виробів; ХТЗ – Харківський турбінний завод; НЗЛ – Невський завод ім. Леніна; НПО "Машпроект" м. Миколаїв (Україна).

Згідно зі стандартом [8] викиди оксидів азоту в перерахунку на діоксид азоту приведені до нормальних умов і вмісту кисню 15% розраховуються за формулою

$$C_{\text{NO}_2} = (\text{NO}_2^m + 0,8 \times \text{NO}^m) \times \rho_{\text{NO}_2} \times \left(\frac{6}{21 - k} \right), \quad (5.8)$$

де NO_2^m – виміряна об'ємна концентрація діоксиду азоту NO_2^m при вмісті кисню k , ppm. За відсутності прямого вимірювання, NO_2^m обчислюється як добуток виміряної об'ємної концентрації оксиду азоту на коефіцієнт 0,05;

NO^m – виміряна об'ємна концентрація оксиду азоту при вмісті кисню k , ppm;

0,8 – коефіцієнт трансформації оксидів азоту в діоксид азоту для стаціонарних двигунів (ГТУ);

$\rho_{\text{NO}_2} = 2,05 \text{ кг/м}^3$ – густина діоксиду азоту за нормальних умов;

k – виміряна концентрація кисню у відхідних газах, %.

Викиди твердих частинок приведені до нормальних умов і вмісту кисню 15%:

$$C_{\text{PM}} = C_{\text{pm}}^m \times \left(\frac{6}{21 - k} \right), \quad (5.9)$$

де C_{pm}^m – виміряна концентрація твердих частинок, мг/м^3 .

В таблиці 5.2 наведено норми викидів для ГТУ, введені в січні 2014 року [8].

Таблиця 5.2 – Норми викидів для газотурбінних установок (охоплюючи газові турбіни комбінованого циклу)

Номінальна теплова потужність, МВт	Вид палива	Норма викидів, мг/м ³		
		Оксидів азоту (NO ₂)		Твердих частинок
		Діючі установки	Нові установки	Діючі і нові установки
1	2	3	4	5
від 0,1 до 5 включно	Газоподібне паливо	200	150	Не нормуються
	Рідке паливо	150	100	
від 5 до 50	Природний газ	150	100	Не нормуються
	Відмінне від природного газу паливо	200	100	
	Рідке паливо	200	120	50
більше 50	Природний газ	90	50	Не нормуються
		150		
більше 50	Відмінне від природного газу паливо	120	50	
		200		
	Рідке паливо	90 200	50	30

Приклад 5.1. Під час вимірювань вмісту шкідливих речовин у димових газах ГТУ були зафіксовані такі показники: вміст кисню в димових газах $O_2=8,3\%$, барометричний тиск $P_b=99,8$ кПа, $\Delta P=-0,003$ кПа, температура повітря $t_{пов}=17$ °С, температура димових газів $t_g=200$ °С, вміст твердих частинок $C_{pm}=50$ мг/м³, $C_{NO}=170$ ppm, концентрація діоксиду азоту не вимірювалась. Відбір проб виконувався приладом, оснащеним осушувачем газів. Знайти концентрацію діоксиду азоту. Викиди твердих частинок привести до нормальних умов.

Розв'язання

Знайдемо концентрацію оксиду азоту NO₂, мг/м³:

$$c_{NO_2} = (170 \times 0,05 + 0,8 \times 170) \times 2,05 \times \frac{6}{(21 - 8,3)} = 139,95.$$

Знайдемо концентрацію твердих частинок, мг/м³:

$$c_{\text{pm}} = 50 \times \frac{6}{(21 - 8,3)} = 23,62.$$

Приклад 5.2. Визначити валовий викид оксидів азоту з відпрацьованими газами ГТУ, якщо витрата палива $B=1000$ м³/год, об'єм сухих газів за турбіною $V_{\text{сг}}=15$ м³/м³, концентрація оксидів азоту у відпрацьованих газах $C_{\text{NO}_2} = 300$ мг/м³. Визначити зниження концентрації оксидів азоту при подаванні вологи в зону горіння, якщо відносна витрата вологи $G/B=0,3$.

Розв'язання

Сумарна кількість оксидів азоту NO_x у перерахунку на NO_2 , г/с

$$M_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_{\text{сг}} \cdot B = 300 \cdot 15 \cdot (1000 / 3600) \cdot 10^{-3} = 1,25.$$

З рисунка 5.2 для $G/B=0,3$ визначимо коефіцієнт, що враховує вплив витрати вологи залежно від відношення введеної вологи G до витрати палива B , $k_{\text{вл}}=1,5$.

Зниження масової концентрації оксидів азоту при подаванні вологи в зону горіння, мг/м³:

$$C'_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2}^{\text{сух}} / k_{\text{вл}} = 300 / 1,5 = 200.$$

Контрольні питання

1. Назвіть шкідливі викиди, що утворюються в процесі роботи ГТУ.
2. Які ви знаєте джерела теплових викидів ГТУ?
3. Як можна зменшити теплові викиди від ГТУ?
4. Назвіть джерела шуму ГТУ.
5. Назвіть способи зменшення рівня шуму від ГТУ.
6. Назвіть способи зменшення оксидів азоту від ГТУ.
7. Які ви знаєте типи ГТУ?
8. Сформулюйте початкові дані, необхідні для розрахунку шкідливих викидів з димовими газами ГТУ.
9. Порівняйте норми викидів для ГТУ різної потужності.
10. Як визначити викиди твердих частинок приведені до нормальних умов і вмісту кисню 15%?
11. Як визначити зменшення концентрації оксидів азоту в димових газах ГТУ в разі подавання вологи в зону горіння?
12. Наведіть формулу для приведення викидів твердих частинок ГТУ до нормальних умов і вмісту кисню 15%.

6 ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ТЕС

6.1 Екологічна ефективність реконструкції електростанцій на основі технології циркулювального киплячого шару

Котли з циркулювальним киплячим шаром (ЦКШ) застосовуються у промисловості понад три десятиліття. За кордоном ця технологія використовується на електростанціях [10].

В Польщі було реконструйовано електростанцію "Турув". Було використано технологію ЦКШ як найбільш дешеву і таку, що відповідає сучасним екологічним і технологічним стандартам. В котлах спалюється паливо з вологістю до 48%, зольністю до 30%, вміст сірки в паливі до 0,8%. Експлуатаційні параметри всіх блоків перевищили проектні значення, підтверджуючи конкурентоспроможність технології ЦКШ щодо великих системних електростанцій. Пробні пуски і тести показали:

- котли з ЦКШ цілком відповідають вимогам УСТЕ з маневреності;
- гарантовані параметри підтримуються в широкому діапазоні навантажень;
- викиди регулюються;
- котли гнучко змінюють навантаження в широкому діапазоні;
- досягається гарантований час безаварійної роботи.

Крім збільшення потужності блоків, збільшився їхній ККД з 32 до 37–39%. Внаслідок цього вдалося скоротити CO_2 на 20%.

Регіон на кордоні Німеччини, Чехії і Польщі, де розташована ТЕС "Турув", був дуже забруднений викидами електростанцій, сконцентрованих на цій території. Ліси знищувалися кислотними дощами і регіон одержав назву "Чорний трикутник". Завдяки реконструкції шість блоків ТЕС "Турув" тепер відповідають європейським вимогам щодо викидів золи, SO_2 , NO_x , CO_2 . Нові блоки ТЕС скоротили викиди SO_2 на 87 тис. т/рік, NO_x – на 5220, золи – на 36,5 порівняно зі старими пиловугільними блоками.

Технологію ЦКШ також використано для електростанцій "Есті" та "Балті" в Естонії. На електростанціях як паливо використовуються сланці. Їхня калорійність коливається від 5 до 20 МДж/кг через вапняк, що містить органічний матеріал, калорійність якого 0,6–2,9 МДж/кг. Сьогодні середня калорійність сланцю, що спалюється на естонських ТЕС – близько 8,4 МДж/кг. Естонські сланці є дуже складним паливом через значний вміст лужних металів і хлору, що призводить до посиленої корозії поверхонь нагрівання конвективної шахти в пиловугільних котлах.

Конструкція нових котлів для електростанцій у Нарві базується на технології котлів "Foster Wheeler" другого покоління, у яких сепаратори з'єднані з топкою і виготовлені з газоцільних панелей, охолоджуваних водою або парою. Використання стінок сепаратора як другого ступеня пароперегрівача дозволило знизити температуру на першому ступені, розташовано-

му в конвективній частині котла, а отже послабити процес високотемпературної корозії.

Таблиця 6.1 – Порівняльні характеристики котлів

Показники	ЦКШ	Пилоугільні котли
Ступінь декарбонізації (ECD)	60–75%	98%
Ефективність зв'язування сірки	Приблизно 100%	75–80%
Викиди SO ₂ (6% O ₂)	Менше 5 мг/нм ³	1500 – 2000 мг/нм ³
Викиди NO _x (6% O ₂)	130–160 мг/нм ³	Приблизно 250 мг/нм ³
Викиди золи (6 % O ₂)	Менше 30 мг/ нм ³	100–2400 мг/ нм ³
Надійність	висока	низька
ККД нетто	38–39%	29–30%

Нині котли з ЦКШ на естонських сланцях є зразком найсучаснішої технології ВАТ – Best Available Technique.

Технологія ЦКШ, яку донедавна застосовували на електростанціях з обмеженнями, сьогодні стає альтернативою традиційній пиловугільній технології спалювання вугілля. Це пов'язано з тим, що технологія ЦКШ має додаткові переваги завдяки таким можливостям: використання в одній і тій же установці різних видів палива, що вилучає необхідність будівництва нових потужностей або реконструкції старих; значне зниження паливної складової витрат завдяки спалюванню низькосортного вугілля; скорочення викидів до необхідного рівня без додаткового будівництва газоочисного обладнання, що істотно зменшує інвестиційну складову проектів.

6.2 Екологічна ефективність парогазових установок із внутрішньоцикловою газифікацією твердого палива

Технології газифікації під тиском для ПГУ на твердому паливі одержали свій розвиток на початку 90-х років минулого сторіччя [10]. На сьогоднішній день у світі працює низка потужних енергоблоків з використанням даного методу термічної переробки твердого палива, ще кілька енергетичних установок знаходяться на стадії будівництва.

Процес газифікації твердого палива є сукупністю гетерогенних і гомогенних реакцій неповного окислення органічної частини палива різними газоподібними окислювачами, що протікають при високих температурах і тисках з утворенням горючого газу, основними компонентами якого є СО, СО₂, Н₂, СН₄ та інші вуглеводні, а також N₂.

Газифікація палива ведеться в спеціальних газогенераторах, отриманий при цьому газ називають генераторним. Як окиснювальні агенти в процесах газифікації, як правило, застосовують повітря, кисень, водяну пару.

При використанні повітряного чи пароповітряного дуття отримують газ з теплотою згорання 4–6 МДж/м³ і з високим об'ємним вмістом N₂ (бі-

льше 40%). Об'ємна частка CO становить близько 30%, інші компоненти CO₂, H₂, CH₄ – частки відсотка.

Газифікацію палива з економічної точки зору найбільш доцільно включати в тепловий цикл ТЕС. Останнім часом набули розповсюдження проекти створення парогазових установок (ПГУ) з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля (ВГВ). Принципова схема ПГУ наведена на рис. 6.1.

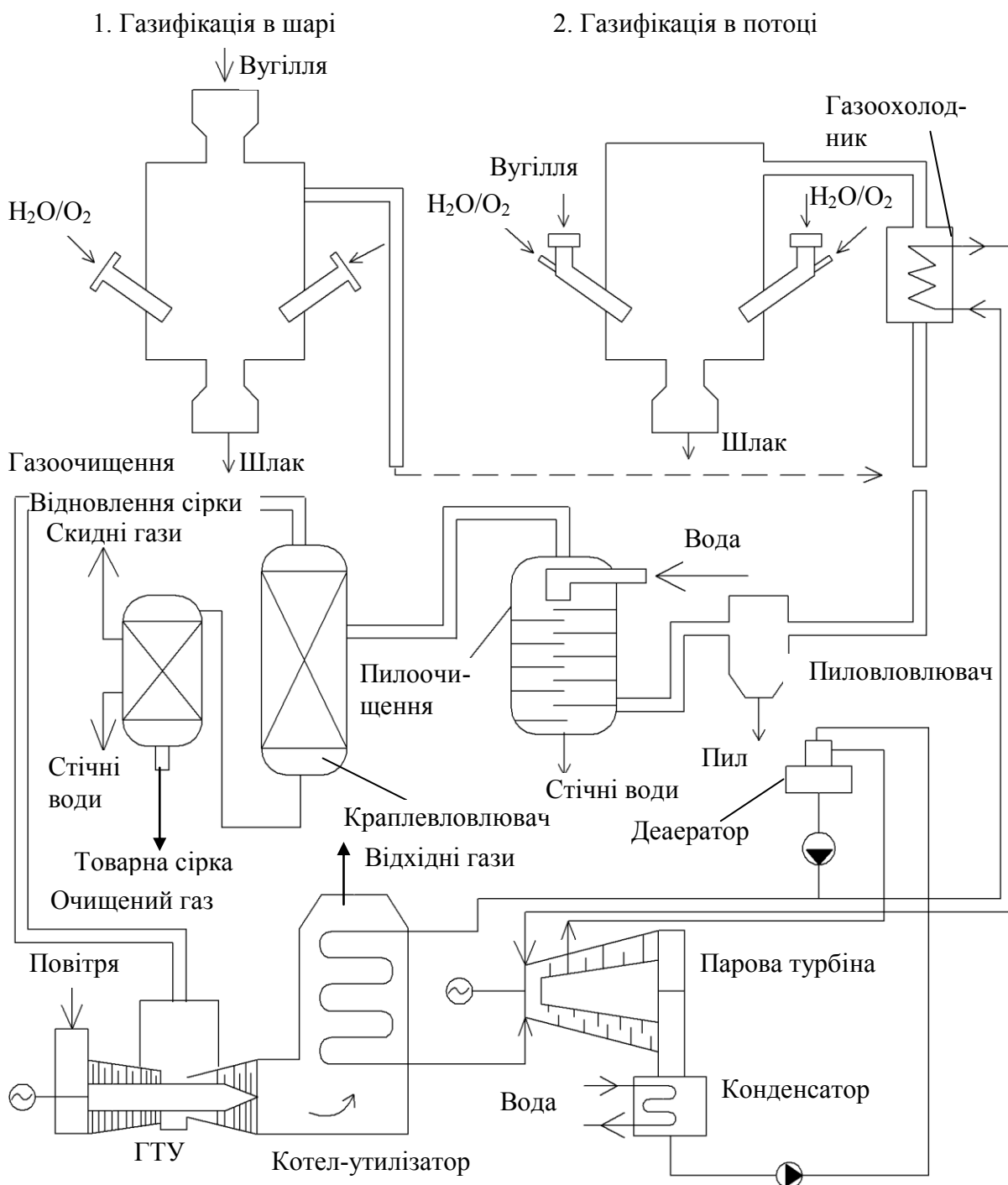


Рисунок 6.1 – Схема ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля

Сухе вугілля надходить в газифікатор. Температура газу на виході з газогенератора становить від 800–920 °С (для газогенератора з киплячим шаром) до 1300–1400 °С (для поточного газогенератора). В процесі газифікації із газогенератора відводиться рідкий шлак. Охолодження газів до температури 270–350 °С виконується в газоохолоднику. Після очищення газ спалнюється в ГТУ, потім надходить в котел-утилізатор. Відхідні гази після котла-утилізатора містять NO_x 60–80 мг/м³, SO_x 10–20 мг/м³ і 1–2 мг/м³ пилу, що суттєво менше, ніж при факельному спалюванні твердого палива. Газифікація ускладнює і здорожчує процес виробництва енергії, але ця технологія є екологічно чистою.

В ПГУ з ВГВ зберігається енергетична частина звичайних бінарних парогазових установок. До неї додається система газифікації вугілля і очищення, в якій виробляється очищений від сполук сірки і золи низько- (4–6 МДж/м³) чи середньокалорійний (8–12 МДж/м³) горючий газ, придатний для спалювання в камерах згорання високотемпературних ГТУ.

Газифікацію палива здійснюють у щільному шарі ("Lurgi", "British Gas-Lurgi"), у різних модифікаціях киплячого шару (високотемпературний процес Вінклера, "U-Gas Tampela" та ін.), у потоці ("GSP", "Texaco", "Shell", "Dow Chemical"). Найбільшого застосування знайшли технології потокової газифікації. Це пояснюється тим, що на цих установках використовується кисневе дуття, пилоподібне або рідке паливо, а процеси конверсії й очищення синтез-газу вже широкомасштабно застосовуються і випробовуються у хімічній промисловості.

У випадку використання рідкого і твердого палив система паливопідготовки містить:

- газифікатор (із щільним або киплячим шаром, потоковий або з розплавом);
- систему очищення від пилу (вологу або суху);
- систему сіркоочистки (низькотемпературну – з використанням діетанооксиду цинку, титанату цинку, фериту цинку або ін., високотемпературну – з використанням оксиду цинку, титанату цинку, фериту цинку та ін.);
- систему видалення аміаку.

Гаряча сіркоочистка із застосуванням суміші оксиду цинку й оксиду титану використовується в проекті "Toms Greek" при електричній потужності ПГУ – 55 МВт. У цьому проекті десульфуризація проходить у дві стадії. На першій стадії основна частина сірки видаляється в киплячому шарі газифікатора вапном або доломітом. Сірководень реагує з карбонатом кальцію (CaCO_2) і оксидом кальцію (CaO) (продуктом випалу вапна і доломіту) з утворенням сульфїду кальцію (CaS). CaS окислюється в газифікаторі з утворенням сульфату кальцію (CaSO_4). На другій стадії залишкова концентрація сірководню в газі після газифікатора залишається на рівні 500–1200 ppm і залежить від марки вугілля і режиму роботи газифікатора. В установці використовується другий ступінь сіркоочистки з використан-

ням регенованого сорбенту (суміш оксидів цинку і титану) для поглинання сірководню. При такій реалізації схеми вдається досягти більше 99% зв'язування сірки.

За рахунок ступеневого спалювання отриманого газу в ГТУ вміст NO_x у продуктах згорання становить менше 20 ppm.

Частина пилу з газового потоку видаляється в циклоні газифікатора, залишок – у нерухомому керамічному фільтрі. У фільтрі використовуються свічки з карбїду кремнію. Свічки періодично продуваються в напрямку, протилежному потоку газу азотом або водяною парою.

6.3 Екологічна ефективність низькотемпературної вихрової (НТВ) технології спалювання твердого палива

Однією з перспективних технологій енергетичного використання твердого палива є НТВ-технологія. Вона може бути реалізована в традиційній камерній топці, шляхом її модернізації в період капітального ремонту котла [10].

Застосування НТВ-технології дозволяє: спростити систему підготовки палива, збільшити її продуктивність, забезпечити вибухобезпечність, знизити витрати на підготовку палива до спалювання; стабілізувати запалення і горіння, відмовитися від підсвічування факела газом або мазутом навіть при спалюванні низькоякісних палив; уникнути шлакування і забруднення топкових і конвективних поверхонь нагріву; забезпечити зниження викидів оксидів азоту NO_x на 20–30%, оксидів сірки SO_x на 20–30% за рахунок введення у вихрову топку добавок, що містять Са.

В основі НТВ-методу покладено принцип організації в камерній топці активної вихрової зони з багаторазовою циркуляцією палаючих частинок палива. Активна вихрова зона стабілізує процес запалювання, що вирішує проблеми спалювання високовологих палив і тих, які важко загоряються. Аеродинаміка вихрової топки дозволяє регулювати розподілення і вигорання палива в об'ємі топки, при цьому знижується рівень максимальних температур у топці, що дозволяє вирішувати проблеми шлакування.

Контрольні питання

1. Назвіть переваги ЦКШ над пиловугільним спалюванням твердого палива.
2. Назвіть закордонні ТЕС, де реалізовано технологію ЦКШ.
3. Що таке газогенерація? Екологічні показники установок з газифікацією вугілля.
4. Які установки входять до складу ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля?
5. Назвіть переваги низькотемпературної вихрової технології спалювання твердого палива. Екологічні переваги НТВ-технології.

ГЛОСАРІЙ

Аерозоль	Aerosol
Азотовмісна сполука	Nitrogen compound
Бензопірен	Benzopyrene
Водовугільна суспензія	Coal-water slurry
Газотурбінна установка	Gas turbine
Газифікація палива	Gasification fuel
Джерело шуму	Noisemaker
Діоксид азоту	Nitrogen dioxide
Десульфуризація	Desulfurization
Зола	Ash
Зона активного горіння	The zone of active combustion
Інерційний золовловлювач	Inertial ashing
Канцерогенна сполука	Carcinogenic compounds
Кислотний дощ	Acid rain
Колчеданна сірка	Pyritic sulfur
Котельна установка	Boiler systems
Мазутна зола	Fuel oil ash
Масова концентрація	Mass concentration
Механічне золовидалення	Mechanical ashing
Оксид азоту	Nitric oxide
Органічна сірка	Organic sulfur
Об'ємна концентрація	Volumetric concentration
Паливні оксиди азоту	Fuel nitrogen oxides
Парниковий ефект	The greenhouse effect
Пентаоксид ванадію	Vanadium pentoxide
Питомий масовий викид	Specific mass ejection
Показник емісії	Emission factors
Рециркуляція газів	Recycling gases
Сажа	Soot
Селективне каталітичне відновлення	Selective catalytic reduction
Сірководень	Hydrogen sulfide
Смог	Smog
Ступінчасте спалювання	Stepped combustion
Сульфатна сірка	Sulfated sulfur
Температура точки роси	Dew point temperature
Теплоємність повітря	Heat capacity of air
Токсичність	Toxicity
Термічні оксиди азоту	Thermal oxides of nitrogen
Забруднювальна речовина	Polutants
Теплове забруднення	Thermal pollution
Шумове забруднення	Noise pollution

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Варламов Г. Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії / Варламов Г. Б. – К. : ІВЦ "Видавництво "Політехніка"", 2003. – 232 с.
2. Росляков П. В. Методы защиты окружающей среды : учебник для вузов / Росляков П. В. – М. : Изд. дом МЭИ, 2007. – 336 с.
3. Безгрешнов А. Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах : учебное пособие для вузов / Безгрешнов А. Н. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. ГКД 34.02.305–2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. – 40 с.
5. Установки котельные. Установки, работающие на газообразном, жидком и твердом топливе. Нормы выбросов загрязняющих веществ : СТБ 1626.1-2006. – [Дата введения 2006-07-01]. – Минск, 2006. – 8 с.
6. Соколов Б. А. Котельные установки и их эксплуатация : учебник для нач. проф. образования / Соколов Б. А. – М. : Изд. центр "Академия", 2007. – 432 с.
7. Христич В. А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / В. А. Христич, А. Г. Тумановский. – К. : Техника, 1983. – 144 с.
8. Двигатели стационарные. Нормы выбросов загрязняющих веществ : СТБ / ПРДС–2013. – [Дата введения 2014-01-01]. – Минск, 2014. – 12 с.
9. Панкратов Г. П. Сборник задач по теплотехнике / Панкратов Г. П. – М. : Высш. шк., 1986. – 248 с.
10. Теплова енергетика. Нові виклики часу / [за заг. ред. П. Омеляновського, Й. Мисака]. – Львів : НВФ "Українські технології", 2009. – 660 с.

Додаток А

У таблиці А.1 наведено інформацію про орієнтовний вміст основних важких металів у робочій масі вугілля родовищ України.

Таблиця А.1 – Вміст важких металів $c_{\text{вм}}$ у енергетичному вугіллі, мг/кг

Вугілля	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Антрацитовий штиб АШ	20	0	47	29	0.28	26	20	40
Донецьке пісне ГР	20	0	47	29	0.20	26	18	40
Донецьке ГР	20	0	47	29	0.14	26	14	40
Донецьке довгополумене- ве ДР	20	0	47	29	0.16	26	16	40
Львівсько-Волинське (ЛВ) ГР	20	0	47	29	0.16	26	16	40
Олександрійське буре Б1Р	20	0	47	29	0.16	26	14	40

Додаток Б

Параметри установок очищення димових газів

В таблицях Б.1–Б.7 наведено орієнтовні значення величин для визначення зменшення викидів забруднювальних речовин залежно від виду палива та технології спалювання.

Таблиця Б.1 – Частка легкої золи $a_{\text{вин}}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулювальним киплячим шаром	0,50	–
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	–
З нерухомим шаром	0,15	–

Таблиця Б.2 – Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у топці

Технологія спалювання	η_I	Примітка
Факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням	0,05	Зв'язування золою палива
Факельне спалювання вугілля в котлах з твердим шлаковидаленням	0,10	Те саме
Факельне спалювання мазуту в котлах	0,02	“
Спалювання в киплячому шарі	0,95	Зв'язування сорбентом у котлі при мольному відношенні $Ca/S \text{ } m = 2,5$

Таблиця Б.3 – Ефективність та коефіцієнт роботи сіркоочисної установки

Технологія десульфуризації димових газів	Параметри сіркоочисної установки	
	η_{II}	β
1	2	3
Мокре очищення – у скрубєрі з використанням вапняку (вапна) або доломіту з одержанням гіпсу	0,95	0,99
Мокре очищення – процес Веллмана-Лорда з використанням солей натрію	0,97	0,99
Мокре очищення – процес Вальтера з використанням аміачної води	0,88	0,99
Напівсухе очищення – розпилення крапель суспензії або розчину сорбенту в реакторі (технології ESOX, GSA, Niro Atomizer)	0,90	0,99
Сухе очищення – інжекція сухого сорбенту (DSI)	0,45	0,98
Напівсухе очищення – процес LIFAC як розвиток процесу DSI з розпилом крапель води	0,80	0,98
Напівсухе очищення – процес Lurgi CFB (з використанням реактора циркулювального киплячого шару) з розпилом крапель води	0,90	0,99
Сухе очищення – абсорбція активованим вугіллям	0,95	0,99
Каталітичне очищення від оксидів сірки і азоту (DESONOX, SNOX)	0,95	0,99

Таблиця Б.4 – Показник емісії оксидів азоту без урахування первинних заходів, г/ГДж

Технологія спалювання	Тверде паливо	Мазут	Газотурбінне паливо	Природний газ
1	2	3	4	5
Факельне спалювання:				
Теплова потужність котла ≥ 300 МВт:	–	200	–	150
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	420	–	–	–
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	250	–	–	–
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	230	–	–	–
Теплова потужність котла < 300 МВт:		140	–	100
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	250	–	–	–
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	180	–	–	–
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	160	–	–	–
з горизонтальною циклонною топкою для кам'яного вугілля	480	–	–	–
Циркулювальний киплячий шар	70	–	–	–
Киплячий шар під тиском	100	–	–	–
Нерухомий шар	100	–	–	–
Камера згорання газової турбіни	–	150	150	120

Таблиця Б.5 – Значення емпіричного коефіцієнта z

Теплова потужність (паропродуктивність) котельної установки	Тверде паливо	Природний газ, мазут
Паровий котел 140 МВт і вище (200 т/год і вище)	1,15	1,25
Паровий котел від 22 до 140 МВт (від 30 до 200 т/год)	1,15	1,25
Водогрійний котел	1,15	1,25

Таблиця Б.6 – Ефективність первинних заходів η_I скорочення викиду NO_x

Тип первинних заходів	Ефективність η_I
Малотоксичні пальники	0,20
Ступеневе подавання повітря	0,30
Подавання третинного повітря	0,20
Рециркуляція димових газів	0,10
Триступеневе подавання повітря та палива	0,35
Малотоксичні пальники + ступеневе подавання повітря	0,45
Малотоксичні пальники + подавання третинного повітря	0,40
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	0,30
Ступеневе подавання повітря + подавання третинного повітря	0,45
Ступеневе подавання повітря + рециркуляція димових газів	0,40
Малотоксичні пальники + ступеневе подавання повітря + рециркуляція димових газів	0,50
Малотоксичні пальники + ступеневе подавання повітря + подавання третинного повітря	0,60

Таблиця Б.7 – Ефективність та коефіцієнт роботи азотоочисної установки NO_x

Технологія очищення димових газів від NO_x	Ефективність η_{II}	Коефіцієнт роботи β
Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ)	0,50	0,99
Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	0,80	0,99
Активоване вугілля	0,70	0,99
DESONOX – SNOX	0,95	0,99

Примітка. Технологія DESONOX та її різновид SNOX базуються на каталітичному очищенні димових газів одночасно від оксидів сірки та азоту.

Навчальне видання

Ткаченко Станіслав Йосипович
Боднар Лілія Анатоліївна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ

Навчальний посібник

Редактор Є. Плетньова
Оригінал-макет підготовлено Л. Боднар

Підписано до друку 15.12.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
5,5. Наклад 50 пр. Зам. № 2017-002.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.