

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ
КАФЕДРА ТЕПЛОТЕХНІКИ

КУРС ЛЕКЦІЙ

**з дисципліни «Особливості експлуатації твердопаливних та
газوماзутних котлів зі збагаченим киснем дуттєвим повітрям»**

Київ 2021

Зміст

Лекція 1 Проектні визначення ккд котлів та впливу на його величину складу дуттєвого повітря.....	3
Лекція 2. Теоретичне обґрунтування необхідності збагачення киснем дуттєвого повітря.	8
Лекція 4. Аналіз перебігу топкових процесів при спалюванні твердих палив.....	21
Лекція 5. Технологічні засоби організації процесів спалювання зі збагаченням киснем дуттєвим повітрям.	27
Лекція 6. Вплив збагачення киснем дуттєвого повітря на процеси в конвективній частині.	35
Лекція 7. Порівняльний аналіз методів отримання кисню.....	36
Лекція 8. Визначення економічного ефекту від збагачення киснем дуттєвого повітря.	40
Література.....	44

Лекція 1 Проектні визначення ккд котлів та впливу на його величину складу дуттєвого повітря.

Послідовність проведення теплового розрахунку котла за - Делягин Г. Н., Лебедев В. І., Пермяков Б.А. «Теплогенерирующие установки: учебник. для вузов» [20], виглядає наступним чином:

- 1) Вихідні данні;
- 2) Розрахункова схема котла;
- 3) Матеріальний баланс котла;
- 4) Тепловий баланс котла;
- 5) Розрахунок теплообміну в топці;
- 6) Розрахунок теплообміну в конвективних поверхнях нагріву котла;
- 7) Розрахунок хвостових поверхонь теплообміну котла;
- 8) Перевірка теплового балансу котла по температурам димових газів.

Розрахунок теоретичної необхідної кількості повітря для згорання вугільного пилу.

Об'єми і ентальпії повітря і продуктів згорання розраховуються на 1 кг вугілля за нормальних умов (0 °C і 101,3 кПа).

При спалюванні вугільного пилу кількість теоретично необхідного кисню знаходять з стехіометрических рівнянь реакцій всіх компонентів палива.

Теоретичний об'єм кисню V_{O_2} , необхідного для повного згорання горючих компонентів, поміщених в 1 кг палива (згідно таблиці. 2.1[Делягин]), можна визначити таким чином:

$$V^0_{O_2} = V^C_{O_2} + V^H_{O_2} + V^S_{O_2} - V^O_{O_2} = 1,866C^p/100 + 5,56H^p/100 + 0,7S^p/100 - O^p_2/(100 \cdot \rho^0_{O_2})$$

В 1 м³ повітря знаходиться 21 % O₂, тому теоретичний об'єм повітря V_0 :

$$V^0 = V^0_{O_2} / 0,21;$$

$$V^0 = (1,866C^p/100 + 5,56H^p/100 + 0,7S^p/100 - O_2/(100 \cdot \rho^0_{O_2})) / 0,21$$

Проведемо розрахунок теоретичного об'єму кисню, необхідного для повного згорання 1 кг вугілля:

$$V_{O_2}^0 = 1,297 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Кількість теоретично необхідного повітря для горіння палива, складе:

- при концентрації кисню в повітрі-21%:

$$V_0 = 6,176 \text{ м}^3/\text{кг}$$

- при концентрації кисню в повітрі-100%

$$V^n = 1,297 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Розрахунок кількості продуктів згорання

Теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_0 + 0,8N_p/100 = 4,879 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{RO_2}^0 = 1,866 \cdot \frac{(C^p + 0,375 \cdot S^p)}{100}$$

Теоретичний об'єм трьохатомних газів CO₂ та SO₂ :

Теоретичний об'єм водяної пари :

Загальний об'єм димових газів:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0$$
$$V^\Gamma = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V^n, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V^\Gamma = 6,679 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Об'ємні долі вихідних газів, рівні парціальним тискам газів при загальному тиску 1 кгс/см².

$$r_{RO_2} = V_{RO_2}/V^\Gamma = 0,158$$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O}^0/V^\Gamma = 0,110$$

$$r_{N_2} = V_{N_2}^0 / V^r = 0,732$$

Кількість теплоти, що міститься в повітрі або продуктах згорання, називають теплотмістом або ентальпією.

Ентальпію трьохатомних газів I_{RO_2} , азоту $I_{N_2}^0$, водяної пари $I_{H_2O}^0$ обчислюємо по формулах:

$$I_{RO_2} = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{RO_2}$$

$$I_{N_2} = V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2}$$

$$I_{H_2O} = V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O}$$

Де: V_{RO_2} - теоретичний об'єм трьохатомних газів, m^3/m^3 ;

$V_{N_2}^0$ - теоретичний об'єм азоту, m^3/m^3 ;

$V_{H_2O}^0$ - теоретичний об'єм водяної пари, m^3/m^3 ;

$(c\vartheta)_{RO_2}$ - ентальпія 1 m^3 трьохатомних газів, kJ/m^3 ;

$(c\vartheta)_{N_2}$ - ентальпія 1 m^3 азоту, kJ/m^3 ;

$(c\vartheta)_{H_2O}$ - ентальпія 1 m^3 водяної пари, kJ/m^3 ;

$(c\vartheta)^n$ - ентальпія 1 m^3 повітря, kJ/m^3 ;

Загальну ентальпію продуктів згорання I_r при відповідній температурі і коефіцієнті надлишку повітря обчислюють підсумовуванням :

$$I_r = I_{RO_2} + I_{N_2}^0 + I_{H_2O}^0 + \Delta I_n$$

Проводимо розрахунок ентальпій димових газів при збільшенні концентрації кисню у дуттьовому повітрі. За розрахованими даними складемо таблицю 3.6.1 та будемо графіки:

Зміну частки ентальпії азоту I_{N_2} в ентальпії димових газів визначаємо за формулою:

$$\beta = (I_{N_2} / I_r) \cdot 100\%$$

Результати розрахунку при зміні концентрації кисню у дуттьовому повітрі зводимо в таблицю.

Попередній розрахунок теплового балансу котла.

1) Кількість введеної в топку теплоти називається наявною теплотою. При використанні в якості палива газу наявна теплота дорівнює нижчій теплоті згорання:

$$Q_H = Q_H^P = 22342 \text{ кДж/кг}$$

2) Визначаються втрати теплоти від механічної неповноти згорання.

При спалюванні газоподібного палива $q_4 = 0 \%$.

3) Вибір температури газів, що йдуть.

Проводимо розрахунки при $\vartheta_{yx} = 100, 110, 120, 130, 150 \text{ }^\circ\text{C}$

4) Визначаємо втрати теплоти з димовими газами :

За таблицею 2.2 інтерполяцією визначаємо I_{yx} при $\vartheta_{yx} = 110, 120, 130, 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Визначаємо ентальпію холодного повітря при $t_{хп}=20^\circ\text{C}$:

$$I_{хп} = V^п \cdot 25,97 \cdot t_{хп} \text{ кДж/м}^3$$

$$q_2 = (I_{yx} - I_{хп} \cdot \alpha_{yx}) \cdot (100 - q_4) / Q_H$$

5) Визначаємо втрати теплоти від хімічної та механічної неповноти згорання.

За довідковими даними (Додаток А):

$$q_3 = 0\% \text{ та } q_4 = 4\%$$

6) Втрати теплоти від зовнішнього охолодження визначаються за довідковими даними (Додаток А):

$$q_5 = 0,26 \%$$

7) Втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків $q_6 = 0 \%$.

8) Методом зворотного балансу визначаємо ККД брутто :

$$\eta_{бр} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6$$

Попередній розрахунок витрати палива

Для парового котла витрата палива розраховується за формулою:

$$B_p = 100 \cdot Q_k / (Q_n \cdot \eta)$$

Де: B - витрата палива (кг/с);

Q_k - розрахункова корисна потужність котла (кДж/с);

Q_n - наявна теплота (кДж/кг);

η - ККД котла (%).

100 – коефіцієнт переведу ККД котла з відсоткової у чисельну форму.

Для розрахунку витрати палива за годину необхідно B_p помножити на 3600.

Проводимо розрахунки для різної концентрації кисню у дуттьовому повітрі. Результати розрахунків заносимо у таблицю. За результатами розрахунків будуємо графік залежності витрати палива від концентрації кисню у дуттьовому повітрі.

Лекція 2. Теоретичне обґрунтування необхідності збагачення киснем дуттєвого повітря.

Збагачення доменного дуття киснем запатентоване в 1876 р. Г. Бессемером та використовується з початку XX століття. Перші дослідження по застосуванню дуття, збагаченого киснем були проведені на бельгійському заводі в Утрі-Марі в 1913 році. Невелика доменна піч цього заводу при роботі на дутті, що містило 23% кисню дала на 12% більше чавуну і показала економію палива на 2,5-3%. У 20 - і роки XX століття Спеціальна комісія Гірського бюро США встановила, що підвищення концентрації кисню в дутті до 31% підвищить продуктивність печі на 18% і знизити витрату палива на 6,7%. [4].

Широке застосування збагачення доменного дуття киснем при виплавці чавуну стало можливим і доцільним при вдуванні в доменні печі паливних добавок, в першу чергу природного газу (комбіноване дуття), який уперше застосували в 1957 р. на доменній печі № 4 заводу ім. Петровського в Дніпропетровську.

Результати використання кисню, як окисника, що наводилися в публікаціях, вражають: питомі витрати палива зменшуються, викиди оксидів азоту знижуються у декілька разів. [5]

Організація процесу повного перемішування повітря з паливом викликає певні труднощі - період утворення суміші природного газу з дуттьовим повітрям обмежений, недостатній для повного перемішування палива з повітрям, паливо-повітряна суміш в робочому об'ємі топок виявляється нерівномірною, в результаті чого якість повітря, як окиснювача погіршується, теоретично необхідна кількість повітря для згоряння палива виявляється недостатньою. Тому в реальних умовах повітря для горіння палива подається в більшій кількості в порівнянні з теоретично необхідним.

Відповідно надлишкова кількість дуттєвого повітря приводить до :

- зростання об'єму вихідних газів;
- зростання втрат тепла з вихідними газами;
- підвищення витрати палива;
- зниження температури газів в топці, від чого паливо горить менш активно і згоряння може стати неповним;
- зниження коефіцієнту корисної дії;
- збільшення у димових газах небезпечних сполук.

Зазначені недоліки можна зменшити за рахунок застосування технології збагачення дуттєвого повітря киснем, при відповідному зменшенні кількості азоту виходячи з передумов:

- горіння – це хімічна реакція окислення, у якій в якості окиснювача виступає кисень;
- азот, який входить до складу дуттєвого повітря є баластом, на підігрів і транспортування якого у тепловій енергоустановці витрачається певна кількість енергії;

– азот, що міститься в повітрі, є основним джерелом появи в продуктах згоряння палива азотистих сполук.

Фізичні основи ефективності застосування кисню, як окисника при спалюванні газів, включають такі параметри:

- висока температура горіння;
- висока концентрація теплової потужності в одиниці об'єму факела;
- невеликий в порівнянні з горінням з повітрям об'єм продуктів згорання палива, отже, менше винесення тепла з газами, що йдуть, при однаковій температурі;

– збільшення теплового потоку внаслідок підвищення концентрації в продуктах горіння випромінюючих трьохатомних газів.

Дана робота пов'язана з розглядом можливості використання технології збагачення дуттєвого повітря котлового агрегату киснем.

Метою дослідження є можливість використання збагачення дуттєвого повітря котла киснем, визначення енергетичної ефективності, економічної доцільності та екологічної безпеки застосування цієї технології.

Для досягнення мети було визначено такі завдання дослідження:

- тепловий розрахунок газового водогрійного котла з урахуванням застосування технології підвищення концентрації кисню у дуттьовому повітрі;
- визначення теплофізичних характеристик процесу горіння газоподібного палива у топковій камері котла при зміні режимів дуття;
- визначення параметрів роботи конвективних поверхонь при зміні режимів дуття;
- розгляд та визначення технології виробництва кисню для застосування у процесі збагачення дуттєвого повітря;
- розгляд енергоефективності застосування технології кисневого збагачення дуттєвого повітря;
- визначення зміни рівня екологічно небезпечних викидів з димовими газами;
- розгляд економічної доцільності застосування технології кисневого збагачення дуттєвого повітря.

Основні теоретичні положення роботи та запропоновані висновки можуть бути використані:

- у практичній діяльності підприємств, зацікавлених у підвищенні енергоефективності експлуатації котлових агрегатів – при генерації пари для

приводу парових двигунів (наприклад, турбін електростанцій), теплоти для потреб промисловості (наприклад, текстильної) і сільського господарства, теплоти і гарячої води для опалювання і гарячого водопостачання споживачів;

- у науково-дослідницькій роботі.

Лекція 3. Аналіз перебігу топкових процесів при використанні збагаченого дуттєвого повітря при спалювальні газу та мазуту.

Опис результатів розрахунків

Із збільшенням концентрації кисню у дуттєвому повітрі відбувається:

- зменшення об'єму азоту у дуттєвому повітрі;
- зменшення об'єму дуттєвого повітря;
- зменшення об'єму та об'ємної долі азоту у димових газах;
- зменшення об'єму та збільшення об'ємної долі водяних парів у вихідних газах;
- збільшення об'ємної долі при постійному об'ємі трьохатомних газів у вихідних газах;
- зменшення загального об'єму димових газів;

Експоненціальне зменшення об'єму азоту обумовлено нерівномірністю ряду значень відношення відсотку азоту до відсотку кисню у дуттєвому повітрі $N_2(\%)/O_2(\%)$, що в свою чергу викликає експоненціальне зменшення об'єму дуттєвого повітря та вихідних газів.

Незначне зменшення об'єму водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням об'єму дуттєвого повітря, відповідно і водяної пари $V^{H_2O}=0,0161V^p$, що міститься у ньому, за умови, що вологовміст газоподібного палива приймаємо $d_f=0$, а водяна пара з'являється у вихідних газах внаслідок реакції горіння вуглеводнів.

Збільшення об'ємних долей, а відповідно і парціального тиску трьохатомних газів та водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів (закон Дальтона).

З підвищенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі ентальпія вихідних газів зменшується експоненціально через експоненціальне зменшення об'єму азоту.

При постійній концентрації кисню, відповідно постійному об'ємі дуттьового повітря та зміні температури вихідних газів ентальпія зростає по лінійному закону за рахунок прийнятого при розрахунку лінійного зростання температури вихідних газів.

Для визначення характеру цієї зміни можна провести оцінку зменшення частки β ентальпії азоту I_{N_2} у ентальпії димових газів.

Різке зменшення частки ентальпії азоту відбувається при збільшенні концентрації кисню при постійній температурі вихідних газів.

Зростання температури вихідних газів при постійній концентрації кисню приводить до незначного зменшення частки азоту.

Враховуючі різницю температур вихідних газів (для концентрації кисню у дуттьовому повітрі 21%), відповідно приймаємо: для топки і камери догорання - 800 ... 2000°C, фестону - 800 ... 1100°C, конвективних пучків - 200 ... 900°C, можна зробити висновок, що значну частку тепловмісту димових газів складає тепловміст азоту, частка якого майже не змінюється на всьому тракту проходження димових газів, що приводить до великих втрат теплоти та зниження ККД котла.

В 3 рази зменшується ентальпія вихідних газів, через зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі при застосуванні збагачення дуттьового повітря киснем.

Тепловий баланс котла - рівність кількості наявної теплоти палива, що надходить в котел, сумі корисно використовуваної в ньому теплоти і

теплових втрат, яка впливає з закону збереження енергії. Зведення такого балансу дозволяє оцінити ККД котла і перевірити теплові розрахунки.

Проведений розрахунок теплового балансу газового водогрійного котла при підвищенні концентрації кисню у дуттьовому повітрі показує:

- зменшується втрата теплоти з вихідними газами (q_2): при $t_{yx} = 110^\circ\text{C}$ на 2,76%, при $t_{yx} = 140^\circ\text{C}$ на 3,67%, при $t_{yx} = 160^\circ\text{C}$ на 4,29%;
- збільшується коефіцієнт корисної дії теплогенератора: при $t_{yx} = 110^\circ\text{C}$ на 2,76%, при $t_{yx} = 140^\circ\text{C}$ на 3,67%, при $t_{yx} = 160^\circ\text{C}$ на 4,29%;

Разом з тим зростання концентрації кисню у дуттьовому повітрі (експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню) викликає нерівномірність зростання ККД котла. Так при збільшенні змісту кисню:

- при $t_{yx}=110^\circ\text{C}$ до 22%, ККД зростає на 0,16%, 22 - 23% - на 0,14%;
- при $t_{yx}=140^\circ\text{C}$ до 22%, ККД зростає на 0,21%, 22 - 23% - на 0,19%;
- при $t_{yx}=160^\circ\text{C}$ до 22%, ККД зростає на 0,25%, 22 - 23% - на 0,23%;

з подальшим зростанням за експонентою.

Найбільш ефективно зростання ККД, що можна побачити з графіка залежності, відбувається в діапазоні 21-30% концентрації кисню у дуттьовому повітрі, в подальшому приріст ККД значно зменшується :

- при $t_{yx}=110^\circ\text{C}$ 30- 31% ККД зростає на 0,08%, 31 - 32% - на 0,07%;
- при $t_{yx}=140^\circ\text{C}$ 30- 31% ККД зростає на 0,11%, 31 - 32% - на 0,10%;
- при $t_{yx}=160^\circ\text{C}$ 30- 31% ККД зростає на 0,12%, 31 - 32% - на 0,11%.

При зростанні температури вихідних газів ККД зменшується, що пояснюється зростанням ентальпії вихідного повітря, відповідно втрат теплоти з димовими газами.

Витрата палива, що спалюється, повинна забезпечувати отримання необхідної кількості корисної теплоти, а також поповнення теплових втрат, що супроводжують роботу котельної установки.

Із збільшенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі відбувається зменшення витрати палива при зменшенні теплових втрат, тобто ККД котла зростає.

Аналіз результатів

Проведене дослідження можливості застосування кисневого збагачення дуттьового повітря показало:

Для виробництва кисню доцільно застосовувати мембранну технологію, проте використання мембранного способу дозволяє отримати низьку чистоту кисню - до 45 відсотків.

Ряд значень відношення відсотку азоту до відсотку кисню у дуттьовому повітрі $N^{п_2}/O^{п_2}$ (таблиця 2.1) має нерівномірний характер, зменшується за експонентою, що пояснює експоненціальне зменшення об'єму азоту при підвищенні концентрації кисню, та в свою чергу експоненціальне зменшення об'єму дуттьового повітря та вихідних газів.

Збільшення об'ємних долей, а відповідно і парціального тиску трьохатомних газів та водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів (закон Дальтона).

Значну частку (β) ентальпії димових газів складає ентальпія азоту (табл.2.3, мал.2.6). Через зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі відбувається зменшення ентальпії вихідних газів, (з 2597 кДж/м³ при 21% змісті кисню у повітрі до 2143 кДж/м³ при 25% змісті кисню), а втрата теплоти з вихідними газами (q_2) зменшується на 0,51%;

Із зменшенням втрат теплоти q_2 зростає ККД котла. Позитивний ефект спостерігається у всьому діапазоні підвищенні концентрації O_2 , але експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню викликає нерівномірність зростання ККД котла. Так при збільшенні змісту кисню до 22%, ККД зростає на 0,327 %, 22 - 23% - на 0,285% з подальшим зростанням за експонентою.

Зменшуються витрати палива на 50,58 м³/год:

- при $O_2 \sim 21\%$ $V_p = 1319,53 \text{ м}^3/\text{год}$;

- при $O_2 \sim 50\%$ $V_p = 1268,95 \text{ м}^3/\text{год}$.

Так як витрата палива повинна забезпечувати отримання необхідної кількості корисної теплоти, а також поповнення теплових втрат, що супроводжують роботу котельної установки, зменшення витрати палива відбувається через зменшення теплових втрат з вихідними газами, тобто при збільшенні ККД котла.

Значення видимого теплового напруження топкового об'єму для обраного виду газоподібного палива при 21% концентрації кисню у дуттьовому повітрі (q_v) складає 327,93 кВт/м³, при збільшенні концентрації кисню знижується із зниженням витрати палива та при 50% складає 317,03 кВт/м³;

Значення теплового навантаження радіаційної поверхні нагріву $q_n = 85,72 \text{ кВт/м}^2$ для обраного виду газоподібного палива при 21% концентрації кисню у дуттьовому повітрі, та при збільшенні концентрації збільшується із збільшенням кількості теплоти, що передається випромінюванням, до величини 146,03 кВт/м². Відповідно до Додатку А значення $q_n = 81 \times 10^2 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год)}$ або 94 кВт/м² (тобто q_n зростає до значень, що в 1,6 разів перевищують визначене при заводських випробуваннях). Підвищення теплового навантаження радіаційних поверхонь нагріву може привести до їх

перегрівання та перепалювання, тому при використанні кисню для збагачення дуттєвого повітря необхідно подбати про збільшення їх площі.

Зростає адіабатична температура горіння на $1419,5^{\circ}\text{C}$ (при повітряному дутті - $1861,15^{\circ}\text{C}$, при концентрації кисню – 0,5- $3280,68^{\circ}\text{C}$), що обумовлено зменшенням об'єму продуктів згорання (при прийнятих обмеженнях - властивості палива, температура підігріву повітря та величина хімічної неповноти згорання q_3 залишаються незмінними);

Знижується температура газів на виході з топки ($\vartheta''_{\text{т.д}}$), що пов'язано з рядом факторів:

- зменшенням витрати палива (зменшуються теплові втрати з вихідними газами);
- зменшенням середньої сумарної теплоємності топкових газів (зменшується корисне тепловиділення в топці та зростає адіабатична температура горіння);
- зростанням ступеня чорноти топки (зростає об'ємна частка трьохатомних газів та водяних парів);

Зростає температура води на виході з топки за рахунок зростання теплоти, що передається випромінюванням (зменшуються втрати теплоти з вихідними газами).

Зменшується коефіцієнт тепловіддачі конвекцією (α_k , $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$) завдяки змін параметрів (W , поправка s_f , яка враховує зміну ϑ'' та $q_{\text{H}_2\text{O}}$), та має значення:

- від $56,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при повітряному дутті (O_2 - 21%) до $28,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O_2 - 50%) – для фестону;
- в межах від $98,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при повітряному дутті (O_2 - 21%) до $57,39 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O_2 - 50%) – для конвективної частини.

Різниця в показниках α_k для фестону та конвективної частини пояснюється конструктивними даними - величини перерізу для проходу топкових газів, із зменшенням якої у конвективній частині, зростає середня швидкість димових газів (підвищується кількість контактів розігрітих частинок вихідного газу з поверхнею нагріву).;

Швидкість продуктів згорання (W , м/с) – зменшується за рахунок зменшення витрати палива та об'єму вихідних газів при постійному значенні перерізу для проходу топкових газів (для різних газоходів).

Зменшується коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням ($\alpha_{\text{л}}$, Вт/(м²·К) від продуктів згорання до зовнішньої стінки поверхні нагріву та має значення:

- в межах від 35,4 Вт/(м²·К) при повітряному дутті (O₂ - 21%) до 16,85 Вт/(м²·К) при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O₂ - 50%) – для фестону;
- в межах від 5,89 Вт/(м²·К) при повітряному дутті (O₂ - 21%) до 4,76 Вт/(м²·К) при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O₂ - 50%) – для конвективної частини.

Зміна значення коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням залежить від параметрів:

- температури продуктів згорання (ϑ , °C) - зменшується при зменшенні баластної складової (N₂) у дуттьовому повітрі;
- температури стінки труб, що сприймають теплоту ($t_{\text{ст}}$, °C) - зростає із зростанням температури води на вході у конвективну частину, при цьому приріст ентальпії води зменшується із зменшенням ентальпії димових газів;
- зміст в продуктах згорання трьохатомних газів - зростає, що приводить до підвищення ступеню чорноти топкових газів (ϵ);
- товщини шару випромінюючих трьохатомних газів (S , м) – для фестону 0,83м, для конвективної частини - 0,08м.

Різниця в показниках $\alpha_{\text{л}}$ для фєстону та конвективної частини пояснюється зменшенням ϑ'' , $t_{\text{ст}}$, ε при проходї димових газів через котел та конструктивними характеристиками котла, які враховуються через товщину шару випромїнюючих трьохатомних газів (S , m).

Зменшується коефіцієнт теплопередачі (K , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) в газоходї, що визначається, як сума коефіцієнту тепловїддачі конвекцією та коефіцієнту тепловїддачі випромїнюванням, з урахуванням коефіцієнту теплової ефективностї.

Кїлькїсть теплоти, переданої крізь поверхню нагрїву ($Q_{\text{т}}$, $\text{кДж}/\text{м}^3$) в результатї проведеного розрахунку та пїдбору температури вихїдних газів теплотї сприйнятою водою ($Q_{\text{б}}$, $\text{кДж}/\text{м}^3$) та зменшується з збїльшенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі.

Зменшується температура димових газів на виходї з конвективної частини через зменшення частки азоту у дуттьовому повітрі, вїдповїдно ї у вихїдних газах, передачу теплоти конвективнїй поверхнї нагрїву.

Пїдвищується температура води на виходї з конвективної частини за рахунок пїдвищення її температури у паливнїй камерї та теплоти, отриманої вїд вихїдних газів.

З урахуванням мембранного способу виробництва кисню економїя енергїї при спалюванні 1 м^3 природного газу складе:

- при концентрації кисню у повітрі 22% - 25,54 кДж ;
- при концентрації кисню у повітрі 30% - 134,44 кДж ;
- при концентрації кисню у повітрі 50% - 244,99 кДж .

Еквівалентна економїя газоподїбного пального при використаннї мембранної технологїї виробництва кисню складе:

- при концентрації кисню у повітрі 22% - 0,00067 $\text{м}^3/\text{год}$;

- при концентрації кисню у повітрі 30% - 0,00332 м³/год;
- при концентрації кисню у повітрі 50% - 0,00587 м³/год.

Зменшується кількість викидів оксидів азоту NO_x.

Значення величин викидів не перевищують вимог нормативів гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел [5] зменшуються із збільшенням концентрації кисню та складають :

- сумарна кількість оксидів азоту NO_x в перерахунку на NO₂ при концентрації кисню O₂= 0,21 - 494 мг/м³ із зменшенням до 170 мг/м³ при O₂= 0,50;
- питомий викид NO_x при концентрації кисню O₂= 0,21 - 0,04 г/МДж, що менше значення наведеного у п.1.3 (табл.1.1) із зменшенням до 0,01 г/МДж при
O₂= 0,5.
- кількість викидів оксидів азоту NO при концентрації кисню O₂= 0,21– 396 мг/с із зменшенням до 137 мг/м³ при O₂= 0,50;
- кількість викидів оксидів азоту NO₂ при концентрації кисню O₂= 0,21 – 64 мг/с із зменшенням до 22 мг/м³ при O₂= 0,50.

Лекція 4. Аналіз перебігу топкових процесів при спалюванні твердих палив.

Для проведення даного теплового розрахунку котла приймаємо наступні початкові умови і допущення:

1. Вважаємо, що повітря складається тільки з азоту (79%) і кисню (21%).
2. Розрахунки проведені при використанні вугілля марки ГЖП. ЦЗФ "Селидівська" його склад та характеристики котла приведені (див. Додаток 1)
3. Коефіцієнт надлишку повітря приймаємо $\alpha=1$. В процесі проходження по газовому тракту котла коефіцієнт надлишку повітря не змінюється;
4. Дуттьове повітря попередньо не підігрівається, має температуру $t^п = 20^\circ\text{C}$.
5. Втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згорання (q_3, q_4) та втрати теплоти від зовнішнього охолодження (q_5) визначаємо за довідковими даними [28]: $q_3 = 0 \%$, $q_4 = 4\%$; $q_5 = 0,26 \%$.
6. Розрахунок проведено згідно нормативному методу «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод» 1973 року, приклад в додатку.
7. Термодинамічні характеристики повітря, азоту, кисню, водяної пари, двоокису вуглецю і інших газів (зокрема, при високих температурах), які використані при проведенні розрахунків, приведені в довідниках[29, 30, 31]:

Опис результатів розрахунків котла ТП-100

Із збільшенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі відбувається: зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі; зменшення об'єму дуттьового повітря; зменшення об'єму та об'ємної долі азоту у димових газах; зменшення об'єму та збільшення об'ємної долі водяних парів у вихідних газах; збільшення об'ємної долі при постійному об'ємі трьохатомних газів у вихідних газах; зменшення загального об'єму димових газів;

Збільшення об'ємних долей, а відповідно і парціального тиску трьохатомних газів та водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів (закон Дальтона).

З підвищенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі ентальпія вихідних газів зменшується експоненціально через експоненціальне зменшення об'єму азоту.

Різке зменшення частки ентальпії азоту відбувається при збільшенні концентрації кисню при постійній температурі вихідних газів. (див. Додатки, рис. 2)

В 3 рази зменшується ентальпія вихідних газів, через зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі при застосуванні збагачення дуттьового повітря киснем. (див. Додатки, рис. 2)

Разом з тим зростання концентрації кисню у дуттьовому повітрі (експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню) викликає нерівномірність зростання ККД котла. (див. Додатки, рис. 5)

Найбільш ефективно зростання ККД, що можна побачити з графіка залежності (див. Додатки, рис. 5), відбувається в діапазоні 21-30% концентрації кисню у дуттьовому повітрі, в подальшому приріст ККД значно зменшується:

При зростанні температури вихідних газів ККД зменшується, що пояснюється зростанням ентальпії вихідного повітря, відповідно втрат теплоти з димовими газами.

Аналіз результатів розрахунків котла ТП-100

Проведене дослідження можливості застосування кисневого збагачення дуттьового повітря показало:

1. Ряд значень відношення відсотку азоту до відсотку кисню у дуттьовому повітрі N_2/O_2 має нерівномірний характер, зменшується за експонентою, що пояснює експоненціальне зменшення об'єму азоту при підвищенні концентрації кисню, та в свою чергу експоненціальне зменшення об'єму дуттьового повітря та вихідних газів.

2. Збільшення об'ємних долей, а відповідно і парціального тиску трьохатомних газів та водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів (закон Дальтона).

3. Значну частку (β) ентальпії димових газів складає ентальпія азоту. Через зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі відбувається зменшення ентальпії вихідних газів та відповідно втрата теплоти з вихідними газами (q_2). (див. Додатки, рис. 3)

4. Із зменшенням втрат теплоти q_2 (див. Додатки, рис. 4) зростає ККД котла. Позитивний ефект спостерігається у всьому діапазоні підвищенні концентрації O_2 , але експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню викликає нерівномірність зростання ККД котла. Так при збільшенні змісту кисню до 22%, ККД зростає на 0,019 %, 22 - 23% - на 0,017% з подальшим зростанням за експонентою.

5. Зменшуються витрати палива на 800 кг/год:

- при $O_2 \sim 21\%$ $V_p = 45700$ кг/год;

- при $O_2 \sim 50\%$ $V_p = 44900$ кг/год.

6. Знижується температура газів на виході з топки ($\theta''_{т.д}$), що пов'язано з рядом факторів:

- зменшенням витрати палива (зменшуються теплові втрати з вихідними газами);

- зменшенням середньої сумарної теплоємності топкових газів (зменшується корисне тепловиділення в топці та зростає адіабатична температура горіння);
- зростанням ступеня чорноти топки (зростає об'ємна частка трьохатомних газів та водяних парів);

7. Швидкість продуктів згорання (W , м/с) – зменшується за рахунок зменшення витрати палива та об'єму вихідних газів при постійному значенні перерізу для проходження топкових газів (для різних газоходів).

8. Незначне зменшення об'єму водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням об'єму дуттьового повітря, відповідно і водяної пари $V_{H_2O}^n = 0,0161V^n$, що міститься у ньому, за умови, що вологовміст газоподібного палива приймаємо $d_f = 0$, а водяна пара з'являється у вихідних газах внаслідок реакції горіння вуглеводнів. (див. Додатки, рис. 1)

Спрощення і припущення, прийняті для теплового розрахунку водогрійного котла КВГМ-11,63

Спрощення і припущення, прийняті для теплового розрахунку водогрійного котла КВГМ-11,63 - аналогічні тим, що прийняті для розрахунку парового котла ТП-100.

Склад газу прийнятий відповідно до даних результатів дослідження вимірювально-аналітичної лабораторії Боярського ЛВУ МГ, ПАТ

"Укртрансгаз" і відповідав вимогам ГОСТ 5542-87 і наведений в додатку (див. Додаток 2). Характеристики котла наведені в Додатку 2.

Результати, отримані в тепловому розрахунку, в основному аналогічні результатам теплового розрахунку котла ТП-100 з відмінностями, обумовленими конструктивними особливостями котла та фізичними особливостями палива.

Найбільша відмінність – це більша, у відсотках, економія палива при збагаченні киснем дуттьового повітря, що пояснюється більшою теплотворною здатністю природного газу.

Загальні висновки

Результати проведених досліджень дозволили зробити наступні висновки.

1. Збагачення киснем дуттьового повітря змінює перебіг тепломасообмінних процесів в топці парових котлів в бік їх інтенсифікації. Інтенсифікація загального теплообміну здійснюється в основному за рахунок об'ємної долі трьохатомних газів в потоковому просторі, зокрема в зоні горіння (факелі).
2. Інтенсифікація тепломасообмінних процесів призводить до збільшення поглинання теплоти в топці і через це до зниження температури на виході з топки.
3. Збагачення киснем дуттьового повітря призводить до підвищення теплової напруги топкового простору.
4. Зменшується кількість продуктів згорання.
5. З'являється можливість зменшення зайвини повітря.
6. У зв'язку зі зменшенням температури продуктів згорання на виході з топки та їх кількості взагалі зменшується температура на виході з котла, що призводить до зростання ККД котла.
7. Взагалі через зменшення температури на виході з котла і кількості та складу димових газів істотно змінюється характеристика процесів теплообміну в конвективній частині котла. Через ці обставини необхідно провести додаткове поглиблене дослідження зміни теплообміну в конвективній частині під вимоги збагачення киснем дуттьового повітря.
8. Існує деяка оптимальна концентрація кисню, перевищення якої не призводить до суттєвих позитивних змін в характеристиках котлів, що

знаходиться в експлуатації, без радикальної реконструкції поверхонь нагріву.

Лекція 5. Технологічні засоби організації процесів спалювання зі збагаченим киснем дуттєвим повітрям.

Під час використання кисню та інших продуктів розділення повітря необхідно дотримуватись вимог чинних нормативно-правових актів.

Подача газоподібних продуктів розділення повітря до металургійних агрегатів повинна бути централізована та здійснюватися по трубопроводах від повітророздільних установок, регулювальних пунктів, реципієнтів, газифікаторів, а за їх відсутності - від розрядних колекторів з балонами.

В окремих випадках за виробничої необхідності допускається подача продуктів розділення повітря з балона через редуктор безпосередньо біля місць їх використання. Балон повинен стійко встановлюватися не ближче ніж 10 м від джерел теплового випромінювання і відкритого вогню та бути захищеним від теплового впливу. При цьому кількість встановлених балонів визначається інструкцією, затвердженою роботодавцем.

Запірну та регулювальну арматуру на трубопроводах продуктів розділення повітря необхідно розташовувати в зручних і безпечних місцях під час обслуговування та освітлювати відповідно до чинних норм освітленості.

Проводити ремонт устаткування, а також трубопроводів продуктів розділення повітря, що перебувають під тиском, не дозволяється.

Організацію ремонтних робіт на устаткуванні та трубопроводах продуктів розділення повітря необхідно здійснювати відповідно до вимог цих Правил.

Відігрівання трубопроводів і арматури необхідно проводити гарячим повітрям, парою або гарячою водою.

Розрядний колектор продуктів розділення повітря повинен бути розташований у спеціально обладнаному місці, передбаченому проектом.

Балони з продуктами розділення повітря у розрядному колекторі повинні бути стійко закріплені. Випускати продукти розділення повітря з балона безпосередньо в трубопроводи, що транспортують їх до місця використання, необхідно через редуктор. На камеру низького тиску редуктора встановлюють манометр і пружинний запобіжний клапан, відрегульований на відповідний дозвільний тиск у місці використання газу.

У спеціальних приміщеннях, що призначені для розміщення вузлів регулювання та розподілу продуктів розділення повітря, розрядних колекторів тощо, необхідно контролювати вміст кисню у повітрі приміщення.

Періодичність контролю визначається затвердженням роботодавцем графіком. Доступ обслуговувального персоналу в зазначені приміщення повинен бути обмежений.

Приміщення повинні бути обладнані відповідними знаками безпеки згідно з ГОСТ 12.4.026-76.

Вимоги безпеки під час застосування кисню

Влаштування та прокладання трубопроводів газоподібного кисню повинно відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів та НД.

Під час проектування зазначених трубопроводів для підприємств чорної металургії необхідно дотримуватися вимог чинних нормативно-правових актів.

Кисневе устаткування, киснепроводи та арматура перед їх монтажем і встановленням повинні бути знежирені у разі перевищення норм жирових забруднень на їх поверхнях. Арматура не підлягає знежиренню перед монтажем, якщо її знежирення було проведено на заводі-виготовлювачі, що підтверджено супровідними документами або відповідним клеймуванням.

Киснепроводи, що прокладені в зоні підвищеної температури або інтенсивного тепловипромінювання, повинні бути теплоізовані.

Методи визначення та норми жирових забруднень на поверхні устаткування та трубопроводів, що контактують з киснем, повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.2.052-81 "ССБТ. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности" (далі - ГОСТ 12.2.052-81).

Методи та періодичність знежирення устаткування повинні бути визначені у нормативно-технічній документації на кисневе устаткування.

Киснепроводи, арматуру та кисневе устаткування необхідно захищати від потрапляння на них мастил, жирів та інших горючих речовин.

Для ущільнення кисневої арматури застосовують матеріали відповідно до ГОСТ 12.2.052-81.

Перевірку щільності киснепроводів (рукавів) і арматури необхідно проводити мильним розчином не менше ніж один раз на півроку із записом результатів перевірки у спеціальному журналі.

Випробування киснепроводів на міцність для виявлення витікань необхідно проводити гідравлічним способом пробним тиском, що становить 1,25 робочого. Для киснепроводів, що працюють під тиском не більше 1,6 МПа (16 кгс/см), що змонтовані на опорах і не розраховані на навантаження під час заповнення киснепроводів водою, допускається проведення пневматичних випробувань на міцність.

Киснепроводи необхідно заземлювати при вводі в будівлі цехів і при виводі з них на контур заземлення цехових електроустановок.

У місцях фланцевих з'єднань повинні бути встановлені постійні струмопровідні перемички.

Киснепровід, що підлягає ремонту, необхідно відключити від діючих киснепроводів і продути повітрям, азотом або парою до зменшення вмісту кисню в ньому не більше ніж 23% (об'ємних), що необхідно контролювати дворазовим аналізом.

Проводити продування киснепроводів повітрям від поршневих компресорів не дозволяється.

Роботи з ремонту киснепроводів і кисневих пристроїв необхідно виконувати не менше ніж двома особами за нарядом-допуском.

У приміщенні для персоналу, який обслуговує кисневе господарство, повинні бути умивальник, мило та рушник.

Вогневі роботи на киснепроводах і кисневому устаткуванні необхідно проводити відповідно до вимог підпунктів 1.24 і 1.25 розділу XIV Правил охорони праці в металургійній промисловості

Відкриття та закриття арматури, встановленої на киснепроводах, необхідно проводити повільно, не допускаючи різких змін параметрів і великих швидкостей руху кисню по трубопроводу для запобігання займанню киснепроводу або окремих його елементів.

Інструмент, що застосовується для обслуговування киснепроводів і кисневих пристроїв, повинен бути обміднений, знежирений і помічений блакитною смугою.

Кисневе устаткування фарбують у блакитний колір або наносять смугу блакитного кольору згідно з ГОСТ 14202-69.

На кисневому устаткуванні, за винятком ЗІЗ, повинен бути напис "Кисень! Небезпечно!". Напис необхідно наносити чорною фарбою на блакитному фоні або блакитною фарбою на будь-якому фоні.

У приміщеннях, де розташовані кисневі пристрої, палити та користуватися відкритим вогнем не дозволяється.

Руки, спецодяг, спецвзуття та рукавиці персоналу, який обслуговує киснепроводи та кисневі пристрої, не повинні бути забруднені мастилом. Палити та підходити до відкритого вогню після закінчення роботи дозволяється тільки після провітрювання одягу. Вішати одяг на фланці або вентилі киснепроводів не дозволяється.

У випадку займання киснепроводу або виникнення пожежі в районі його розташування киснепровід треба негайно відключити.

Рукави (шланги), що застосовуються для ремонтних потреб і пропалювання льоток, сталевипускних отворів, шпурів, повинні відповідати класу III за ГОСТ 9356-75 "Рукава резиновые для газовой сварки и резки металлов. Технические условия".

На гумових рукавах не можна допускати жиркових, масляних забруднень, тріщин, розривів.

Металеві трубки для пропалювання повинні бути сухі та без слідів мастила. Мінімальна залишкова довжина трубки під час пропалювання повинна бути не менше ніж 1,5-2 м.

Кріплення рукавів до штуцерів, а також до трубок необхідно виконувати спеціальними затискачами, що унеможливають їх зрив.

У разі відбору кисню з трубопроводу арматуру для приєднання рукавів необхідно розміщувати в металевій шафі з отворами або щілинами для вентиляції.

Дверці шаф під час роботи повинні бути відкриті. За відсутності працівника, який користується вентилем, шафу необхідно закривати на замок.

Розпізнавальне фарбування шаф і сигнально-попереджувальні написи на них повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.3.008-75 "ССБТ. Производство

покрытий металлических и неметаллических неорганических. Общие требования безопасности".

Розводка киснепроводів у цехах повинна відповідати проекту.

За відсутності на підприємствах кисневих станцій допускається застосування газоподібного кисню в балонах.

Обмеження

Для централізованої подачі кисню повинен бути влаштований розподільний пристрій (рампа), з якого кисень подається до місць його використання.

Киснева рампа повинна бути розташована на нульовій відмітці в окремому вогнестійкому приміщенні.

Приміщення рампи повинно бути обладнано вентиляцією, опаленням та освітленням. Палити та користуватися відкритим вогнем у приміщенні рампи не дозволяється.

Шланги (рукави), що застосовуються для підведення кисню до місць використання, повинні бути гнучкі.

Кисневі балони у приміщенні рампи необхідно встановлювати у спеціальні стояки, що виключають можливість їх падіння.

Редуктор рампи повинен бути розміщений поза стінкою приміщення, а загальний вентиль - у приміщенні рампи.

Редуктор необхідно періодично розбирати та прочищати.

Запас балонів необхідно зберігати на складах, передбачених проектом.

Спільне зберігання в одному приміщенні балонів з киснем і горючими газами не дозволяється. Зберігати та транспортувати балони на підприємстві необхідно згідно з інструкцією, затвердженою роботодавцем.

Під час зберігання, транспортування та поводження з кисневими балонами необхідно виключити можливість забруднення їх мастилом.

Використання кисню з балонів з несправним редуктором або манометром не дозволяється.

Пристрій для приєднання кисневих рукавів (шлангів) під час ремонтних робіт повинен бути розташований у зручних і безпечних місцях.

Для обслуговувального персоналу, який працює у місцях, де можливе утворення підвищеної концентрації кисню, необхідно застосовувати одяг, виготовлений з гладких, компактних, неворсистих тканих матеріалів з антистатичними домішками. Використання комбінованих тканин з штучного та натурального волокна не дозволяється.

Використання запірної арматури, що встановлена на технологічних трубопроводах як регулювальна, а регулювальної як запірної, не дозволяється.

Експлуатація устаткування та трубопроводів у разі витікання продуктів розділення повітря через нещільності в арматурі або з інших причин не дозволяється.

Використання продуктів розділення повітря з несправним редуктором або манометром не дозволяється.

Розміщувати кисневу арматуру в приміщеннях щитів керування технологічними агрегатами не дозволяється.

Використовувати для знежирення устаткування та трубопроводів чотирихлористий вуглець не дозволяється.

На киснепроводах не дозволяється застосовувати арматуру зі сплавів на основі титану.

Розбирати вентилі та змінювати ущільнювальні елементи вентилів кисневих балонів у цехах, що їх використовують, не дозволяється.

Перевіряти щільність за допомогою вогню або тліючих предметів не дозволяється.

Лекція 6. Вплив збагачення киснем дуттєвого повітря на процеси в конвективній частині.

Зменшується коефіцієнт тепловіддачі конвекцією (α_k , Вт/(м²·К) завдяки змін параметрів (W , поправка c_f , яка враховує зміну ϑ'' та γ_{H_2O}), та має значення:

- від 56,4 Вт/(м²·К) при повітряному дутті (O₂ - 21%) до 28,68 Вт/(м²·К) при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O₂ - 50%)— для фестону;
- в межах від 98,35 Вт/(м²·К) при повітряному дутті (O₂ - 21%) до 57,39 Вт/(м²·К) при збагаченні дуттєвого повітря киснем (O₂ - 50%)— для конвективної частини.

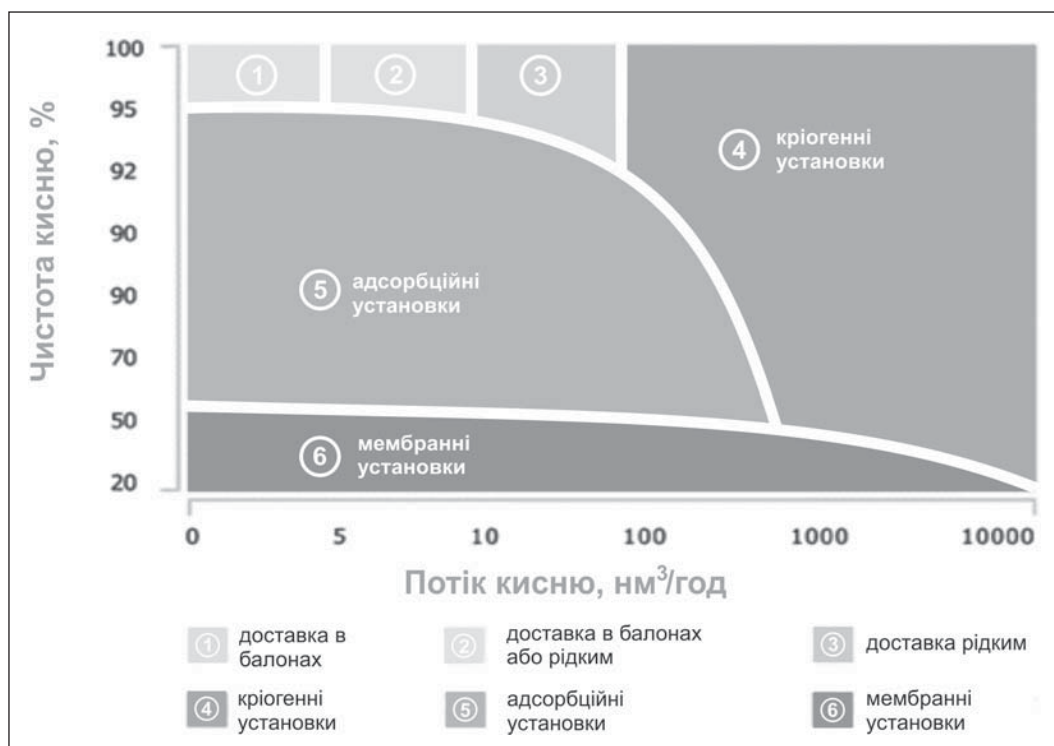
Різниця в показниках α_k для фестону та конвективної частини пояснюється конструктивними даними - величини перерізу для проходу топкових газів, із зменшенням якої у конвективній частині, зростає середня швидкість димових газів (підвищується кількість контактів розігрітих частинок вихідного газу з поверхнею нагріву).;

Швидкість продуктів згорання (W , м/с) — зменшується за рахунок зменшення витрати палива та об'єму вихідних газів при постійному значенні перерізу для проходу топкових газів (для різних газоходів).

Лекція 7. Порівняльний аналіз методів отримання кисню.

В металургії вже досить давно використовується так зване «кисневе дуття», для якого кисень за місцем споживання отримують кріогенним способом. Однак кріогенне розділення повітря, з огляду на його високі характеристики щодо якості (чистота 99.5-99.85%), є досить дорогим способом отримання промислових газів (кисню, азоту та аргону).

Більш простим та дешевшим способом збагачення киснем атмосферного повітря є його розчинення у звичайній воді, а потім її дегазація. При цьому варто пам'ятати, що обсяги розчинених газів пропорційні парціальним тискам основних компонентів в атмосферному повітрі. Відповідно до наближених розрахунків у 100 об'ємах води може розчинитися, при заданих умовах, 0,8 обсягів кисню і 1,6 обсягів



Якісна характеристика процесу отримання кисню розділенням повітря за допомогою розглянутих технологій та способів доставки споживачу

атмосферного азоту. Нескладний за апаратурним оформленням процес дегазації води забезпечить збагачення киснем отриманої суміші у 1,5 раза.

Досить поширеним некріогенним методом розділення повітря як газових сумішей є адсорбційний метод, в основі якого лежить вибіркове поглинання того чи іншого газу адсорбентами.

Широке застосування метод отримав через такі переваги:

- високу розділювальну здатність завдяки правильному вибору адсорбенту;
- швидкий пуск та зупинка, а також швидка зміна продуктивності порівняно з кріогенними установками;
- можливість дистанційного керування та автоматичного регулювання технологічним процесом;
- низькі енергетичні затрати та затрати на обслуговування, а також просте апаратне оформлення.

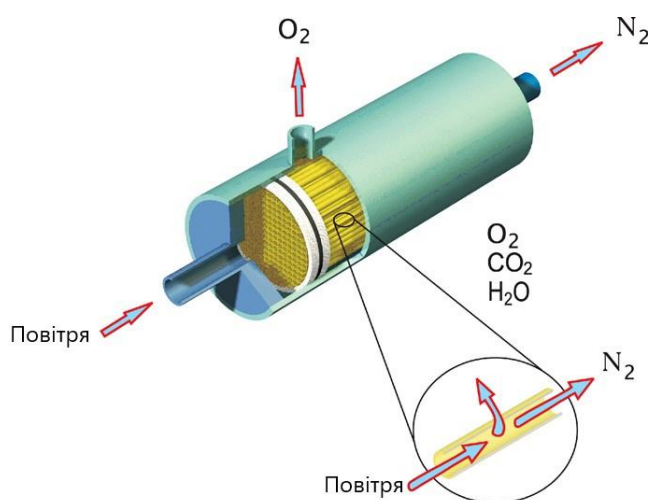
Адсорбційний спосіб отримання азоту та кисню з атмосферного повітря забезпечує порівняно високі якісні характеристики при низькій собівартості, а для комбінованих парогазових енергетичних установок можливе комплексне використання як кисню для інтенсифікації процесу горіння, так і азоту для формування робочого тіла при газовому способі генерації електричної енергії.

При отриманні кисню адсорбційним способом азот поглинається алюмосилікатними молекулярними ситами значно швидше за кисень. Для відокремлення азоту від кисню повітря спочатку стискають, а потім пропускають через адсорбер, отримуючи на виході кисень. Абсорбент поглинає газ до стану рівноваги між абсорбцією і десорбцією. Після чого абсорбент необхідно регенерувати, тобто видалити з поверхні адсорбента поглинутий газ. Регенерація проводиться шляхом підвищення температури, або шляхом зниження тиску. Зазвичай використовують зниження тиску. Невелика тривалість циклів абсорбції і десорбції, як правило, в межах кількох хвилин і дала назву процесу - «короткоциклова адсорбція». Чистота

кисню як кінцевого продукту може становити до 95%, що для вугільних блоків теплових електростанцій більш ніж достатньо.

Установки короткоциклової абсорбції повністю збираються заводом-виробником, випробовуються та здаються замовнику у повній виробничій готовності, що сприяє швидкому монтажу та наладці. Продуктивність таких установок - у діапазоні 10-6000 м³/год.

У 70-х рр. минулого століття почалось промислове використання технології мембранного розділення повітря, що призвело до реальної революції в різних галузях промисловості. Нині ця технологія активно розвивається і сягає дедалі більшого поширення завдяки простоті реалізації та високій економічній ефективності. Суть роботи мембранної установки полягає в селективній проникності матеріалу мембрани різними компонентами газової суміші. З метою очищення повітря фільтрується, стискується до необхідного рівня, осушується та подається на мембранний модуль. Більш швидкі молекули кисню та аргону проходять через полотно мембрани та збираються в окремому газгольдері. Сучасна газорозділювальна мембрана як основний елемент установки являє собою вже не пласку мембрану чи плівку, а пустотіле волокно. Пустотіла волоконна мембрана складається із пористого полімерного волокна із нанесеним на його



зовнішню поверхню газорозділювальним шаром. Газовий потік під тиском подається в пучок мембранних волокон. Завдяки різниці парціальних тисків

на зовнішній і внутрішній поверхнях мембрани відбувається поділ газового потоку. Чистота отриманих газів визначається кількістю модулів, через які проходить повітря. При цьому дедалі більшою стає концентрація азоту, а також у залишковій частині збільшується концентрація кисню. На рисунку приведені якісні характеристики процесу розділення повітря на кисень та азот із метою порівняння та вибору придатних технологій для конкретних умов промислового використання.

З рисунку стає зрозуміло, що найбільш придатною для використання отриманого при розділенні повітря кисню для інтенсифікації процесу спалювання твердого палива в теплоенергетичних установках в широкому діапазоні витрат окислювача може бути абсорбційна технологія, завдяки невисоким вимогам щодо його чистоти. Більша витрата кисню понад 10 000 нм³/год може забезпечуватися паралельним включенням абсорбційних установок.

Лекція 8. Визначення економічного ефекту від збагачення киснем дуттєвого повітря.

Визначимо основні складові енергозберігаючого ефекту від збагачення киснем дуттєвого повітря, що застосовується при спалюванні газоподібного палива:

- зниження теплових втрат з димовими газами;
- зниження об'єму дуттєвого повітря.

Разом з тим необхідно враховувати витрату енергії на промислове виробництво кисню за технологіями, що набули найбільшого розвитку :

- кріогенною, де в основі роботи лежить метод низькотемпературної ректифікації, що базується на різниці температур кипіння компонентів повітря і відмінності складів, що знаходяться в рівновазі рідких і парових сумішей;
- адсорбційною - використовується явище селективної гетерогенної адсорбції кисню з повітря твердим адсорбентом;
- мембранною, де у основі розділення газових середовищ лежить різниця в швидкостях проникнення компонентів в газовій суміші через речовину мембрани та процес розділення обумовлений різницею в парціальних тисках на різних сторонах мембрани.

Зниження теплових втрат з димовими газами при збагаченні дуттєвого повітря киснем можна виразити таким чином:

$$\Delta E_1 = \Delta Q_2 = c_{N_2} \cdot [V_{N_2}^n (t_{yx}^n - t_o) - V_{N_2}^c (t_{yx}^c - t_0')]$$

де: $\Delta E_1 = \Delta Q_2$ - кількість теплоти, що звільнилася за рахунок зниження теплових втрат з димовими газами, кДж;

- c_{N_2} - питома теплоємність азоту при температурі t_{yx} , (кДж/(м³ · К));

- $V_{N_2}^n$ та $V_{N_2}^c$ - об'єм баластного азоту, що міститься в повітрі і в повітряно-кисневій суміші, що подаються на горіння, m^3 ;
- t_{yx}^n та t_{yx}^c - температура димових газів на виході з котла, при використанні для дуття повітря та повітряно-кисневої суміші;
- t_0 - початкова температура підігрівання відповідно дуттєвого повітря або суміші, $^{\circ}C$.

Фактично величина ΔQ_2 еквівалентна теплоті згорання деякої кількості газу ΔV_1 і частки теплоти суміші повітря і кисню, що вноситься.

Розрахунок величини ΔV_1 проводимо, маючи на увазі, що теплота, яка виділяється при спалюванні $1 m^3$ природного газу дорівнює нижчій теплоті згорання палива Q_H , kJ/m^3 (Додаток Б).

$$Q_H^p = 34390 \text{ кДж/м}^3$$

Тоді:

$$\Delta V_1 = \Delta E_1 / (Q_H^p \cdot \eta_k), m^3$$

де η_k - ККД котла при зміні концентрації кисню у дуттєвому повітрі (табл.5.1).

Економія енергії при зниженні об'єму повітря, що подається в зону горіння, може бути оцінена виходячи з рівняння перебігу ідеальної рідини (рівняння Бернуллі) без врахування, через малість дисипації, енергії, пов'язаної з в'язкістю азоту і втратами у дуттєвому механізмі.

Для реальних умов слід врахувати коефіцієнт підвищення потужності k_1 залежно від умов роботи (при температурі довкілля $t_{nc} = 20^{\circ}C$ і висоті над рівнем моря до 1000 м, $k_1 = 1,2$), коефіцієнт запасу по продуктивності і напорі ($k_2 = 1,2$), а також ККД дуттєвого вентилятора (прийmemo $\eta_b = 0,7$):

$$\Delta E_2 = p \cdot \Delta V_{нов} \frac{k_1 \cdot k_2}{\eta_b} = 2,06 \cdot p \cdot \Delta V_{нов}$$

де: $\Delta V_{\text{пов}}$ - зменшення об'єму дуттєвого повітря при підвищенні концентрації кисню:

$$\Delta V_{\text{пов}} = V_{\text{п}} - V_{\text{с}}$$

- $V_{\text{п}}$ - об'єм дуттєвого повітря при концентрації кисню 21%;
- $V_{\text{с}}$ - об'єм дуттєвого повітря при підвищенні концентрації кисню;
- $\eta_{\text{в}}$ - ККД дуттєвого вентилятора: $\eta_{\text{в}} \approx 70\%$;
- p - тиск повітря (суміші) перед пальником, p , кПа.

Для пальників типу РГМГ-100, що використовуються для котлів КВ-ГМ-11,65-150: $p \approx 7 \text{ кПа}$.

У перекладі на витрату газу можемо записати, що доля економії складе:

$$\Delta V_2 = \Delta E_2 / (Q_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{к}}), \text{ м}^3$$

Розглядаючи доцільність вживання кисню для збагачення дуття, слід враховувати, що експлуатовані у даний час дуттєві механізми, як правило, приводяться в дію електромоторами, а первинним паливом при виробленні електроенергії є природний газ. Отже, необхідно оцінити економію первинного палива з врахуванням ККД теплових електростанцій і втрат електроенергії при транспортуванні до споживача, трансформації, а також безпосередньо в приводі самого механізму. З врахуванням вказаних втрат в середньому для енергосистеми цей коефіцієнт рівний $\eta = 0,4$, а рівняння буде мати вигляд:

$$\Delta V_2 = \Delta E_2 \cdot \eta / (Q_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{к}}), \text{ м}^3$$

Для видалення димових газів можуть використовуватися димососи. Тоді за умови, що димові гази перед димососом не розбавляються повітрям для пониження температури (як це інколи робиться у високотемпературних печах), величину економії за рахунок зменшення вжитку електроенергії двигуном димососа можна розрахувати аналогічно .

3. Додаткова витрата енергії на вироблення кисню для збагачення дуттєвого повітря може бути розрахована таким чином [43]:

$$\Delta E_3 = \alpha \cdot V_{O_2} \cdot E_0 \cdot \frac{\delta - \delta_0}{\delta - \delta \cdot \delta_0} \cdot (1 - \Delta V_1)$$

де: E_0 - питома витрата енергії на вироблення кисню, кДж/м³;

- V_{O_2} - теоретично необхідний об'єм кисню, м³;

- α - коефіцієнт надлишку повітря;

- δ_0 - частка кисню у дуттєвому повітрі ($\delta_0=0,21$);

- δ - частка кисню у суміші повітря та кисня;

Згідно з роботами [39,46,57,58] питома витрата енергії (E_0) на виробництво 1м³ кисню при використанні найбільш поширених в даний час способів розділення повітря (криогенного, адсорбційного і мембранного) складає 720 - 2800 кДж/м³.

Тоді по аналогії з попередніми розрахунками додаткова витрата енергії на здобуття кисню еквівалентна:

$$\Delta V_3 = \Delta E_3 / (Q^p_n \cdot \eta_k), \text{ м}^3$$

Таким чином ефект від збагачення повітря киснем буде дорівнювати:

$$E = \Delta E_1 + \Delta E_2 - \Delta E_3, \text{ кДж/м}^3$$

що еквівалентно економії газоподібного пального:

$$V = \Delta V_1 + \Delta V_2 - \Delta V_3, \text{ м}^3$$

Література

1. Міхненко С. ВДЕ тренди 2021 року. AW-THERM. Січень-лютий 2021, с.22-23. URL: <https://aw-therm.com.ua/vde-trendi-2021-roku/> (дата звернення 10.05.2021).
2. 2050 Long-Term Strategy | Climate Action. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (дата звернення 19.03.2020).
3. Солнечная панель дешевле 3 долларов за квадратный метр? Это теперь возможно. AW-THERM. Січень-лютий 2021, с.30-32. URL: <https://aw-therm.com.ua/pv-panel-deshevle-3-dollarov-za-kvadratnyj-metr/> (дата звернення 06.06.2021).
4. Хватит ли Земли для ВИЭ? AW-THERM. Січень-лютий 2021, с.26-29. URL: <https://cutt.ly/bm2hW4R> (дата звернення 12.07.2021).
5. В EDF отметили отсутствие пользы от перехода Германии на возобновляемые источники энергии. URL: <https://energosmi.ru/archives/40145> (дата звернення 12.07.2021).
6. Oxygen generator plants by Linde. URL: <https://cutt.ly/ObOBGht> (дата звернення 15.07.2021).
7. PSA and Membrane Gas Separation Technology - The Frequently asked Question. URL: <https://www.noxxior.com/service/faq.html> (дата звернення 19.07.2021).
8. Установка короткоцикловой адсорбции (КЦА). URL: <https://cutt.ly/9bOXloo> (дата звернення 19.07.2021).
9. Мембранные кислородные установки. URL: <https://cutt.ly/qbOXPM3> (дата звернення 15.07.2021).
10. М. П. Кулик, Т. Ю. Кравець, М. М. Семерак Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці. URL: <https://cutt.ly/ebOBhaB> (дата звернення 15.07.2021).

11. Карп І.Н., Зайвий А.Н., Марцевой Е.П., П'яних К.Е. Використання кисню і збагаченого киснем повітря в нагрівальних пічах, колодязях, стендах розігрівання сталерозливних ковшів./ Енерготехнології та ресурсозбереження. № 3, 2012. -К.: Інститут газу НАН України, 2012.- с.18-29.
12. Кабишов С. М., Трусова И. А., Ратников П. Э., Менделев, Д. В., Румянцева, Г. А. Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах./ Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 35 – Минск : БНТУ, 2014. – с. 8 - 16.
13. Кабишов С. М.; Трусова И. А.; Ратников, П. Э.; Менделев Д. В. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздушной смеси кислородом / Литье и металлургия : научно-производственный журнал. № 3(67), 2012.- Минск : БНТУ, 2012. -с. 218 - 221.
14. Sanghyun Park, Jungeun A. Kim, Changkook Ryu, Won Yang, Young Ju Kim, Sangil Seo, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon Korea «Effects of gas and particle emissions on wall radiative heat flux in oxy-fuel combustion». URL: <https://cutt.ly/xbOMa1q> (дата звернення 19.07.2021).
15. Yukun Hu, KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes Stockholm, Sweden, «CO₂ capture from oxy-fuel combustion power plants». URL: <https://cutt.ly/qbOMzpt> (дата звернення 19.07.2021).
16. Isabel Guedea, Irene Bolea, Carlos Lupiañez, Luis I. Díez, Luis M. Romeo., (CIRCE, Spain), «Oxyfuel combustion of Spanish anthracite in fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/EbOMmf1> (дата звернення 19.07.2021).

17. Monika Kosowska-Golachowska, Adam Luckos, Konrad Klos, Tomasz Musial, (Czestochowa University of Technology Institute of Thermal Machinery Armii Krajowej Czestochowa, Poland), «Oxy-combustion of different coals in a circulating fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/5bOMEHx> (дата звернення 19.07.2021).
18. Toni Pikkarainen, Jaakko Saastamoinen, Heidi Saastamoinen, Timo Leino and Antti Tourunen, (Technical Research Centre of Finland), «Development of 2nd generation oxyfuel CFB technology – smallscale combustion experiments and model development under high oxygen concentrations». URL: <https://cutt.ly/obOMYQt> (дата звернення 19.07.2021).
19. Nov. 11, 1856: Bessemer Becomes the Man of Steel. URL: <https://www.wired.com/2010/11/nov-11-1856-bessemer-becomes-the-man-of-steel-2/> (дата звернення 20.07.2021).
20. Ратников П. Э., Менделев Д. В. Оптимизация топливно-кислородных режимов сжигания газообразного топлива в теплогенерирующих установках ;
21. Ратников П. Э., Менделев Д. В., Трусова, И. А., Кабишов, С. М. Техничко-экономическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности./ Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. № 6, 2013. -Минск : БНТУ, 2013.- с. 52 - 58.
22. Тимошпольский В. И., Кабишов С. М., Трусова И. А. и др. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива/ Энергоэффективность. № 1, 2013.- Минск: РУП Белинвестэнергосбережение, 2013.- с. 32 - 34.
23. Тимошпольский В. И.; Кабишов С. М.; Трусова И. А.; Менделев Д. В.; Румянцева Г. А. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива/Энергоэффективность. № 12, 2013.- Минск: РУП Белинвестэнергосбережение, 2013.-с. 36 - 38.

24. Мищенко М. В., Маслов В. А., Дзюбенко О. Л. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом / Современные научные исследования и инновации. №7, 2011 - М.: Международный научно-инновационный центр, 2011.
25. Список тепловых электростанций Украины. URL: <https://cutt.ly/bm2jJcZ> (дата звернення 20.07.2021).
26. В. Б. Клепиков, С. А. Мехович, С. В. Клепикова Экономический, энергоресурсосберегающий и экологический аспекты экономии электроэнергии в Украине // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2010. №12 (82). URL: <https://cutt.ly/gbOVIM7> (дата звернення 19.07.2021).
27. В.П. Дрьомін, Г.П. Костенко, О.В. Згуровець Аналіз витрат палива блоками ТЕС і можливостей їх економії при регулюванні електроспоживання. Проблеми загальної енергетики. 2008. №17. URL: <https://cutt.ly/vbOVDrP> (дата звернення 19.07.2021).
28. Белосельский Б. С., Барышев В. И. Низкосортные энергетические топлива: Особенности подготовки и сжигания. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 136с.
29. Семергей В. А., Бирюков А. Б. Совершенствование технологи сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов. с.24.
30. Б.Б.Рохман, Численный анализ различных схем реконструкции существующей системы пылеприготовления при переводе парогенератора ТП-100 с АШ на газовый каменный уголь. с.6-16.
31. Мірошніченко Є.С., Чернявський М.В., Порівняльний аналіз застосування різних схем організації пилосистем котла ТП-100 для спалення кам'яного вугілля з досягненням оптимального топкового режиму. ст. 13-32

32. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод./Под ред. Кузнецова Н. В. и др.- М.:Энергия,1973.-296 с.
33. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. 4-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат,1987.- 288 с.
34. Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д. и др. Термодинамические свойства азота. ГСССД. Серия: монографии. - М.: Издательство стандартов, 1977. - 352 с.
35. Александров А. А., Григорьев Б. А.Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара.Справочник.- М:МЭИ, 1999 - 169 с.
- 36.Лавров Н. В., Физико-химические основы горения и газификации топлива [Текст] / Проф. д-р техн. наук Н. В. Лавров. - Москва: Металлургиздат, 1957. - 288 с. : схем.; 23 см.
- 37.А. С., Хитрин Л. Н., Цуханова О. А., Колодцев Х. И., Гродзовский М. К. Горение углерода — М.—Л.: Издательство АН СССР, 1949. — 407 с.
- 38.Делягин Т.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки -М.: Стройиздат, 1986. - 560 с.
39. Skeen, Scott, "Oxygen-Enhanced Combustion: Theory and Applications" (2009). All Theses and Dissertations (ETDs). 325.
- 40.Теплофизика горения пылеугольного топлива: монография / В. В. Калинин, А. С. Черненко — Одесса : Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, 2017. – 236 с.