



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний університет водного господарства
та природокористування

О.П. Костюк

ПАЛИВО ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО СПАЛЮВАННЯ



Навчальний посібник

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Для студентів напряму підготовки
6.050601 „Теплоенергетика”

Рівне 2011



УДК 662.611 (075.8)

ББК 31.35 я 73

К72

Затверджено вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.

(Протокол № 7 від 24 червня 2011 р.)

Рецензенти:

Лозбін В.І., доктор технічних наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування.

Давидчук В.І., канд. техн. наук, доцент Національного університету водного господарства та природокористування.

Костюк О. П.

К72 Паливо та обладнання для його спалювання: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2011. – 121 с.

У навчальному посібнику систематизовано основні відомості про властивості газоподібного, твердого та рідкого палива, розглянуті питання горіння палива та технічні питання спалювання. Наведено конструкції пальників та форсунок різних типів, специфіка їх роботи та вимоги до вибору пристроїв для спалювання палива.

Посібник призначено для студентів вищих навчальних закладів напряму підготовки 6.050601 „Теплоенергетика”, а також буде корисний спеціалістам, магістрам і аспірантам, які працюють у цій галузі.

УДК 662.611 (075.8)

ББК 31.35 я73

© Костюк О.П., 2011

© НУВГП, 2011



ПЕРЕДМОВА

Прискорення науково-технічного прогресу залежить від повного задоволення потреб країни в паливно-енергетичних ресурсах. Ця проблема вирішується шляхом збільшення видобутку палива і впровадження активної енергозберігаючої політики. Більшість сучасних виробництв супроводжується теплотехнологічними процесами.

Паливо є головним джерелом теплової енергії на планеті, а процес горіння носить специфічний хімічний характер для кожного виду палива. Цей процес є головним для більшості технологій по виробництву будівельних матеріалів та виробів, при отриманні гарячих теплоносіїв в системах опалення, при отриманні електричної енергії та у теплових машинах.

За даними Всесвітньої конференції по енергії при незмінному у світовому масштабі споживанні окремих енергоносіїв, підтверджених резервів вугілля вистачить на 350 років, нафти на 30 років та природного газу на 50 років. Якщо врахувати зростання споживання енергії (наприклад щорічний приріст на 4%), то підтверджених запасів енергоносіїв буде за наближеними даними у 4-5 разів менше.

Обмеженість запасів палива на планеті та екологічна небезпечність процесу його спалювання приводить до необхідності впровадження енергозберігаючих та екологічно чистих технологій отримання енергії.

Розглядаючи основні напрямки економії та підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, доцільно зупинитись на основних причинах низького рівня кінцевого використання енергії: широке розповсюдження карбюраторних двигунів внутрішнього згорання, розсіювання теплоти у будинках та спорудах, втрати теплоти при виробництві чорних металів внаслідок використання застарілого та недостатньої теплоізоляції обладнання і низького використання вторинних енергетичних ресурсів (повторного використання відпрацьованої теплоти). Необхідно також звернути увагу на напрямок підвищення ефективності добування палива та економії паливно-енергетичних ресурсів на стадії їх початкової обробки, перетворення, транспортування, розподілу та кінцевого використання.

При вивченні цього курсу студенти повинні чітко уявляти всі процеси, які пов'язані з процесом горіння палива, знати характеристики різних видів палива, вміти оптимально підбирати паливо та проводити розрахунки всіх пристроїв та процесів, які забезпечують спалювання палива.



1. ПАЛИВО ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ В ПРОМИСЛОВІСТІ ТА ПОБУТІ

1.1. Загальні поняття та класифікація палива

Паливом називаються горючі речовини, які окислюються з виділенням теплоти та які доцільно використовувати для цієї мети при спалюванні в технічних пристроях з метою отримання теплоти.

Великий російський вчений Д. І. Менделєєв говорив: “Нафта не паливо – палити можна і банкноти”. Це говорить про те, що не все, що горить, доцільно використовувати в якості палива. В якості палива можна використовувати горючі речовини, які відповідають наступним вимогам:

- виділення при спалюванні достатньо великої кількості теплоти;
- продукти згоряння повинні бути екологічно чистими;
- значні запаси в природі або можливість добування у великій кількості штучним шляхом;
- економічно доцільне добування та транспортування до місць використання;
- порівняно легке запалювання.

Горіння – складний фізико-хімічний процес, який включає в себе хімічні реакції окислення з фізичними явищами: рухом газоподібних середовищ, молекулярною дифузією, запаленням, розповсюдженням полум'я (факела), виділенням і передачею теплоти, а також видаленням продуктів згоряння із зони горіння.

Вивчивши закономірності процесу горіння палива можна найбільш ефективно організувати його спалювання, підвищити ефективність його використання, розробити нові способи і пристрої для його спалювання.

Паливо може бути *природним* і *штучним*. Природне паливо може знаходитись над і під земною поверхнею, запаси його обмежені і воно не потребує великих затрат на переробку. Штучне паливо отримується в результаті переробки різних вуглеводнів.

В залежності від виду внутрішньої енергії розрізняють *хімічне* і *ядерне* паливо. Хімічне паливо виділяє теплоту в результаті окислення органічних зв'язків. Ядерне паливо виділяє теплоту за рахунок перетворення атомних ядер.

Ядерне паливо при розпаді атомних ядер (поділ атомів або їх си-



нтез) виділяє теплоти набагато більше, ніж паливо при звичайному згорянні.

При розпаді 1 кг ядерного палива виділяється теплової енергії більш ніж в 2,5 млн. разів більше, ніж при згорянні 1 кг самого калорійного кам'яного вугілля. Запаси ядерного палива в перерахунку на кількість виділяємої теплоти на земній кулі в декілька десятків раз перевищують запаси теплової енергії всього природного палива. В майбутньому одним з джерел енергії стане керований термоядерний синтез легких атомних ядер, наприклад дейтерій, який міститься в воді. В цьому випадку із 1 кг звичайної води можна отримати теплової енергії більше, ніж при спалюванні 1 кг нафти.

До природного палива можна віднести торф, вугілля, горючі сланці, нафту, природний газ.

До штучного – газогенераторний газ, доменний газ, коксовий і інші. Все це паливо отримують в результаті переробки природного палива.

Тверде паливо при його добутку складає негорючі (мінеральні) домішки, які доцільно видаляти до його спалювання. Цей процес отримав назву – *збагачення*, а паливо – *збагачене*. При спалюванні збагаченого палива виділяється теплоти більше, ніж при спалюванні “брудного” палива.

В залежності від призначення, паливо розділяють на енергетичне і технологічне.

Енергетичне паливо – це паливо, яке спалюється з метою отримання теплоти у вигляді електричного струму, гарячої води, пари і т.п. *Технологічне паливо* призначене для переробки з метою отримання цінних продуктів (масел, барвників, сажі, і т.п.), для здійснення різних технологічних процесів (виплавки чавуну, сталі; обпалу, загартування та відпуску сталі і т.п.). В якості промислового палива використовується мазут (кінцевий продукт переробки нафти), кам'яне і буре вугілля а також відходи їх переробки. Необхідно відмітити, що останнім часом найбільшого розповсюдження набуває комплексне енерготехнологічне паливо.

Однотипні види палива при їх видобутку в різних місцях виділяють різну кількість теплоти при спалюванні одиниці маси, що значно затрудняє оцінити запаси палива і встановити норми його використання. Відповідні труднощі виникли б і при оцінці еквіва-



лентних по теплоті кількостей палива, наприклад, вугілля і газу, газу і нафти і т.д. Для рішення цієї задачі введено поняття *теплоти згоряння* (див. п. 1.4). Це значення дозволяє легко визначити кількісні величини різного палива при однаковому виділенні ними теплоти.

Паливо, як в промисловості, так і в побуті має дуже велике значення. В побуті паливо використовується для готування їжі, обігріву приміщень і теплиць, отримання гарячої води і т.д. Паливо використовується в металургійній, скляній, цементній, харчовій і інших видах промисловості. Важко переоцінити значення технологічного палива. Наприклад, при переробці природного газу вдалося вивільнити цілий ряд сільськогосподарських культур. Так, для отримання 1 тонни синтетичного каучуку необхідно було б переробити 9 тонн відбірного зерна, або 22 тонн картоплі, або 30 тонн буряків. Синтетичний каучук на даний час отримують з природного газу.

При використанні природного газу, в порівнянні з твердим паливом, в різних вогнетехнічних установках їх ккд збільшується в 2 рази, а час обробки, наприклад металу, скорочується на 30...40%. В доменному виробництві природний газ дозволяє збільшити продуктивність печі на 5 %, а витрату коксу при цьому знизити на 15 %. З використанням природного газу в СНД виготовляється 93 % всієї випускаємої сталі, чавуну 50 % прокату, 35 % кольорових металів, біля 70 % цементу. З природного газу отримують сірку, гелій, етан, нафталін, моторні палива, сажу, зріджений газ і т.д.

З нафти отримують більше 300 різних цінних продуктів, і в тому числі високоякісні авіаційні сорти бензину.

В останній час світові запаси палива оцінюються в 13 тис. млрд. тонн умовного палива. Цих запасів при використанні 1,2 трлн. тонн в рік вистачить людству приблизно на 95...100 років. На сьогоднішній день забезпеченість України власного добутку нафти (з конденсатом) складає 10...12%, газом – 25...28%, сировиною для хімічної промисловості – 55%.

1.2. Походження, видобування, переробка і зберігання палива

Тверді горючі корисні копалини утворились в результаті трива-



лого розпаду рослинних, тваринних залишків, а також мікроорганізмів без доступу повітря при впливі високих тисків і температур. Основна частина маси рослин складається з клітковини (целюлоза), яка і є вихідною речовиною для утворення горючих твердих копалин. Рослини, в тому числі і деревина, містять також різні смоли, органічні кислоти, а також водні розчини органічних і мінеральних сполучень. Клітковина і білки в результаті тривалого перетворення в ґрунті розкладаються з виділенням CO_2 , N_2 , O_2 і H_2 і розчиняються в ґрунтових водах; а вуглеводні і жири є основними компонентами для утворення корисних копалин. Склад горючого твердого палива залежить від початкового рослинного матеріалу і умов його перетворення.

В залежності від глибини залягання і геологічних умов розрізняють *підземний* (шахтний) і *відкритий* (кар'єрний) способи добування твердого палива. При шахтному добуванні використовуються комбайни, а при відкритому спочатку знімається верхній шар породи, а потім з допомогою екскаваторів паливо завантажують на транспорт. Відкритий спосіб набагато продуктивніший і дешевший. Тверде паливо при тривалому його зберіганні під впливом навколишнього повітря і вологи поступово втрачає свої властивості. При цьому паливо подрібнюється, знижується температура його згоряння. Паливо можна зберігати в штабелях, але при цьому може виникнути самозапалення. Температура, при якій може виникнути самозапалення, отримала назву *критичної температури зберігання палива*. Наприклад, критична температура зберігання для бурого і кам'яного вугілля складає $60\text{...}70\text{ }^\circ\text{C}$. Антрацит при зберіганні не самозапалюється. Для запобігання самозапалення палива штабелі ущільнюють, а також захищають його поверхню від сонячного випромінювання (побілка вапняком, встановлення екранів). Штабелі один від одного необхідно розміщувати на відповідній відстані. Періодично необхідно заміряти температуру палива з допомогою термометри. При наближенні температури до критичного значення штабелі необхідно розібрати і бажано паливо використати. Паливо також можна брикетувати.

Розрізняють два способи збагачення твердого палива – *гравітаційний* і *флотаційний*. Гравітаційний спосіб оснований на відокремленні палива від породи за рахунок відмінностей їх густин. При сухому гравітаційному способі в потоці повітря, при мокрому – в



потоці води. Флотаційний спосіб оснований на різній степені змочуваності поверхні палива і породи. При цьому подрібнене вугілля подається в потік води через яку барботується повітря. Частинки палива, які погано змочуються (гідрофобні), прилипають до повітряних бульбашок і піднімаються вгору, а частинки породи осідають на дно.

Тверде паливо можна піддавати термічній переробці – нагрів попередньо підготовленого палива без доступу повітря (кисню). Розрізняють *низькотемпературне коксування* (напівкоксування) при нагріві палива до температури 550 °С і *виськотемпературне коксування* – при кінцевій температурі нагріву палива до 1000...1100 °С.

При напівкоксуванні з палива видаляється волога, горючі і негорючі гази і потім смолисті речовини. Твердий залишок – *напівкокс* – називають “бездимним паливом”. Напівкоксування використовують для бурого вугілля, сланців, кам’яного вугілля, які мають достатню кількість смолянистих складових.

При виськотемпературному коксуванні виникає розклад виділених раніше смолистих сполучень. Твердий залишок *кокс* – це технологічне паливо при доменному виробництві у металургійній промисловості. Газоподібний продукт – *коксівий газ*, що складається з CO, H₂ і невеликої кількості різних вуглеводнів, теплота згоряння напівкоксівого газу до $15 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$, коксівого до $18 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$.

Нафту і газ добувають з допомогою скваржин. Розрізняють такі способи добування нафти: *фонтанний*, *компресорний* і *глибинно-насосний*. В тільки-що пробуреній скваржині, коли надлишковий тиск газу високий (20...30 МПа) використовують фонтанний спосіб а потім переходять на компресорний або насосний. При компресорному способі в скваржину закачується повітря, яке аерує нафту і піднімає її на поверхню. При насосному способі нафта відкачується з скваржини з допомогою насосів, що опускають в скваржину. Для більш повного видобування нафти в пласт через скваржину подають воду або пару. Використовуючи ці способи можна з місця скупчення видобути до 50...60 % початкових запасів нафти.

В нафтових пластах при високому тиску в нафті знаходяться в розчиненому вигляді різні вуглеводневі гази, кількість яких залежить від тиску і температури. При виході нафти з скваржини тиск



газу падає і з неї виділяється горючий газ, який отримав назву “*попутний газ*”. Він має високу теплоту згоряння, а при його переробці з нього можна отримати зріджений газ або цінні хімічні продукти.

Нафту перед переробкою зневоджують і знесолюють (видаляють агресивні сполуки по відношенню до металів). Зневоднення нафти здійснюється шляхом відстоювання або центрифугування.

Розрізняють чисто газові, газо-нафтові, газо-нафтововодяні і газоконденсатні місця скупчення, які утворюються в результаті міграції (переміщення) газу і нафти по газонафтоносним пластам (колекторам). Тому слово “*родовище*” носить чисто умовний характер. Потрібно говорити – “*місце скупчення*”.

При експлуатації газоконденсатних місць скупчення фонтанним способом вдається добути 50% газового конденсату (волога, що зконденсувалася, і яка містить різні вуглеводні), так як по мірі видобутку газу тиск в пласті падає і виникає зворотна конденсація. Щоб збільшити кількість добувного конденсату в газовому пласті підтримують надлишковий тиск, що дозволяє добути до 80 % газового конденсату. Зараз увесь газовий конденсат перероблюється на заводах. Перед подачею газу в магістральний газопровід здійснюється первинна його очистка від механічних домішок і вловлювання крапельної вологи, а потім на головному спорудженні – тонка очистка, сушка, видалення з газу H_2S , CO , CO_2 , нафталіну, смоли, сірки і інших небезпечних для горіння продуктів. Очищений від H_2S газ не має запаху, тому з метою полегшення його виявлення в нього додають одорант. Найбільш широке використання для цих цілей отримав етилмеркаптан а сам процес отримав назву – *одорування*. Одоризація газу здійснюється в установках, які називаються одоризаторами.

Найбільш простим способом переробки нафти являється пряма гонка нафти, основана на різних температурах кипіння бензину, керосину, дизельного палива і мазуту. При прямій гонці нафти молекулярна структура вуглеводнів не руйнується. Бензин, отриманий при прямій гонці нафти, не може служити моторним паливом в зв'язку з низьким октановим числом. Для отримання моторного палива здійснюється глибока переробка нафти – *термічний і каталітичний крекінг*. При термічному крекінгу при температурі 450...600 °C і швидкій зміні тиску на 4...5 МПа здійснюється пере-



творення тяжких вуглеводнів на більш легкі, що мають більш високе октанове число. З метою прискорення процесу і збільшення виходу моторного палива використовують різні каталізatori, тоді процес називають “каталітичний крекінг”. Кінцевий продукт термічного і каталітичного крекінгу – *крекінг мазут*, котрий використовується як котельне паливо.

Існувала велика кількість теорій походження нафти і газу. Найбільш достовірною – це змішана теорія походження нафти і газу. Її суть в наступному. Залишки рослинного і тваринного світу під впливом складних процесів перетворювались в гнильний мул (сапропель), який під впливом солоної води перетворювався в смолоподібну речовину, яка в свою чергу при високому тиску і температурі перетворювалась в складні вуглеводні в виді нафти і газу. В розробку змішаної теорії великий внесок зробив геолог – академік І. М. Губкін.

1.3. Способи задання складу палива

Склад твердого або рідкого палива задається у відсотках від 1 кг маси. Склад може бути заданий за допомогою компонентів, що у нього входять. Розрізняють такі маси твердого або рідкого палива:

- органічну масу твердого або рідкого палива;
- горючу масу твердого або рідкого палива;
- суху масу твердого або рідкого палива;
- робочу масу твердого або рідкого палива.

Компоненти, які входять в склад тієї чи іншої маси палива, наведені в табл. 1.1.

Наводячи характеристику твердого палива, необхідно враховувати те, що сірка може знаходитись в паливі у наступних видах: органічна S_o , колчеданна S_k та сульфатна S_c . Органічна сірка як правило знаходиться у вигляді з'єднань з компонентами органічної частини палива, колчеданна сірка міститься у з'єднаннях FeS_2 , а сульфатна у з'єднаннях $CaSO_4$, $FeSO_4$.

Органічна та колчеданова сірка окислюються (горять), а сульфатна сірка не окислюється і її відносять до золи, а тому при розрахунках які пов'язані з складом палива органічну і колчеданову сірку можна сумувати.



Таблиця 1.1

Компоненти палива

Назва та умовне позначення елемента палива	Органічна маса	Горюча маса	Суха маса	Робоча маса
Вуглець С	C^O	C^G	C^C	C^P
Водень Н	H^O	H^G	H^C	H^P
Кисень О	O^O	O^G	O^C	O^P
Азот N	N^O	N^G	N^C	N^P
Сірка S		S^G	S^C	S^P
Зола А			A^C	A^P
Волога W				W^P

Необхідно відмітити, що склад палива в перерахунку на будь-яку масу, обов'язково повинен бути рівним 100%, виконання цієї умови необхідно перевіряти кожний раз, коли задано склад палива.

Для переходу від однієї маси палива до іншої необхідно знати відсутні елементи палива, тобто на яку масу виконується перерахунок.

При бажанні можна здійснювати перерахунок з однієї маси на іншу, при цьому доцільно скористатися табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Коефіцієнти перерахунку елементарного складу палива

Задана по довіднику маса палива	Органічна маса	Горюча маса	Суха маса	Робоча маса
Органічна маса	—	$\frac{100 - S^G}{100}$	$\frac{100 - S^C - A^C}{100}$	$\frac{100 - S^P - A^P - W^P}{100}$
Горюча маса	$\frac{100}{100 - S^G}$	—	$\frac{100 - A^C}{100}$	$\frac{100 - A^P - W^P}{100}$
Суха маса	$\frac{100}{100 - S^C - A^C}$	$\frac{100}{100 - A^C}$	—	$\frac{100 - W^P}{100}$
Робоча маса	$\frac{100}{100 - S^P - A^P - W^P}$	$\frac{100}{100 - A^P - W^P}$	$\frac{100}{100 - W^P}$	—

Коефіцієнт перерахунку позначається літерою K_T . Перерахунок складу палива з однієї маси на іншу здійснюється шляхом почер-



ГОВОГО МНОЖЕННЯ КОЖНОГО КОМПОНЕНТА ПАЛИВА НА КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕРАХУНКУ.

Приклад 1.

Розв'язання

Задано
нку

$C^Г = 60\%$

Перейти
 $C^P =$

1. Визначаємо коефіцієнт перерахунку

$H^Г = 10\%$

$H^P =$

$$K_T = \frac{100}{100 - A^P - W^P} > 1,0 \text{ не підходить}$$

дять

$O^Г = 10\%$

$O^P =$

$$K_T = \frac{100 - A^P - W^P}{100} < 1,0 \text{ підходить.}$$

бочу

$N^Г = 10\%$

$N^P =$

2. Склад у перерахунку на рому масу

$S^Г = 10\%$

$S^P =$

$$C^P = C^Г \cdot K_T = 60 \cdot K_T =$$

$$H^P = H^Г \cdot K_T = 10 \cdot K_T =$$

$$O^P = O^Г \cdot K_T = 10 \cdot K_T =$$

$$N^P = N^Г \cdot K_T = 10 \cdot K_T =$$

$\sum = 100\%$

$A^P =$

$A^P = 5\%$

$W^P =$

$W^P = 10\%$

$\sum = 100\%$

$$S^P = S^Г \cdot K_T = 10 \cdot K_T =$$

Горюча

Робоча

$A^P =$

$W^P =$

Приклад 2.

Перерахувати склад смоли з горючої маси на робочу.

Задано: $C^Г = 90,0\%$; $H^Г = 7,0\%$; $S^Г = 1,0\%$; $N^Г = 0,2\%$;

$O^Г = 1,8\%$; $A^P = 0,8\%$; $W^P = 7,0\%$.

Розв'язання

1. Перевіримо правильність завдання складу палива

$$\sum_{i=1}^5 G_i^Г = 90,0 + 7,0 + 1,0 + 0,2 + 1,8 = 100\%$$

$$\text{або просто } \sum_{i=1}^5 G_i^Г = 100\% .$$

2. Коефіцієнт перерахунку з горючої маси на робочу

$$K_T = \frac{100 - A^P - W^P}{100} = \frac{100 - 0,8 - 7,0}{100} = \frac{92,2}{100} = 0,922 .$$

3. Склад смоли в перерахунку на робочу масу наведений в табл. 1.3.



Таблиця 1.3

Склад смоли в перерахунку на робочу масу

Склад смоли в перерахунку на робочу масу	Заокруглюємо	Остаточний склад
$C^P = C^Г \cdot K_T = 90,0 \cdot 0,922 = 82,98\%$	82,98%	+0,01=82,99%
$H^P = H^Г \cdot K_T = 7,0 \cdot 0,922 = 6,454\%$	6,45%	6,45%
$S^P = S^Г \cdot K_T = 1,0 \cdot 0,922 = 0,922\%$	0,92%	0,92%
$N^P = N^Г \cdot K_T = 0,2 \cdot 0,922 = 0,184\%$	0,18%	0,18%
$O^P = O^Г \cdot K_T = 1,8 \cdot 0,922 = 1,6596\%$	1,66%	1,66%
$A^P = 0,8\%$	0,8%	0,8%
$W^P = 7,0\%$	7,0%	7,0%
	$\Sigma = 99,99\%$	$\Sigma = 100\%$

В округленому складі $\Sigma \neq 100,0\%$, тому до C^P додаємо 0,01%, тобто уточнюємо склад за рахунок компонента, що має найбільший відсоток.

Приклад 3.

Перерахувати склад палива з горючої маси на органічну.

Задано

Розв'язання

$C^Г = 60\%$ $C^O =$

$H^Г = 10\%$ $H^O =$

$O^Г = 10\%$ $O^O =$

$N^Г = 10\%$ $N^O =$

$S^Г = 10\%$

+0,01=66,67%

$\Sigma = 100\%$

1. $\Sigma G_i^Г = 100\%$

2. Коефіцієнт перерахунку

$$K_T = \frac{100}{100 - S^Г} = \frac{100}{100 - 10} = \frac{100}{90} = 1,111$$

3. Склад у перерахунку на органічну масу

$C^O = C^Г \cdot K_T = 60 \cdot 1,111 = 66,66\%$

$H^O = H^Г \cdot K_T = 10 \cdot 1,111 = 11,11\%$ 11,11%

$O^O = O^Г \cdot K_T = 10 \cdot 1,111 = 11,11\%$ 11,11%

$N^O = N^Г \cdot K_T = 10 \cdot 1,111 = 11,11\%$ 11,11%

$\underline{99,99\%}$ $\underline{100\%}$

Склад палива в перерахунку на органічну масу:

$C^O = 66,67\%$; $H^O = 11,11\%$; $O^O = 11,11\%$; $N^O = 11,11\%$.

Середній склад у відсотках суміші твердих або рідких палив, за-



даних масовими долями, – першого $C_1^P, \%$; $H_1^P, \%$;... і другого $C_2^P, \%$; $H_2^P, \%$;... – визначають за залежностями

$$C_{\text{сум}}^P = b_1 \cdot C_1^P + (-b_1) \cdot C_2^P ; \quad H_{\text{сум}}^P = b_1 \cdot H_1^P + (-b_1) \cdot H_2^P \text{ і т.д.}$$

де b_1 - масова доля першого палива у суміші, $b_1 = \frac{B_1}{B_1 + B_2}$,

де B_1 і B_2 - маса першого та другого палива, які входять у суміш, кг.

Газоподібне паливо складається з горючих компонентів $\text{CO}, \text{H}_2, \text{CH}_4, \text{C}_m\text{H}_n$ та негорючі компоненти $\text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2$ та незначної кількості водяної пари H_2O . Склад газоподібного палива виражають у відсотках від об'єму приведенного до 1 м^3 при нормальних термодинамічних умовах або приведених до стандартних умов. Якщо до складу газоподібного палива входить H_2O (водяна пара), то газоподібне паливо називається *вологим*. Якщо водяна пара відсутня – *сухим*. В усіх довідниках заданий склад сухого газоподібного палива, тому що в процесі його транспортування вологість палива може змінюватися в результаті конденсації з нього водяної пари.

Для переходу від сухого складу газоподібного палива на вологий повинен бути заданий його *вологівміст*. За нормальних термодинамічних умов ($P_n = 760 \text{ мм. Hg} = 1,033 \text{ ат} = 101,3 \text{ кПа}$; $t_n = 0^\circ \text{C} = 273,15 \text{ K}$), вологовміст газоподібного палива рівний

$$d_{\Gamma} = 8 \frac{z \cdot \text{H}_2\text{O}}{M_n^3}.$$

Коефіцієнт перерахунку сухого газоподібного палива на вологий газ виводять, розмірковуючи наступним чином: для того, щоб ввести вологу (у вигляді водяної пари) в склад палива, необхідно кожний компонент сухого газу помножити на коефіцієнт перерахунку $K_{\Gamma} < 1$, так як сума компонентів вологого газу після перерахунку повинна рівнятися 100%. Для 1 м^3 сухого газу, приведенного до нормальних термодинамічних умов, можна записати

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + V_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (1.1)$$

де $V_{\text{H}_2\text{O}}$ - об'єм води, яка міститься в 1 м^3 палива, приведенного до нормальних термодинамічних умов.



$$V_{H_2O} = \frac{d_{\Gamma}}{\rho_{H_2O}^{н.у} \cdot 10^3} = \frac{d_{\Gamma} \cdot 22,4}{\mu_{H_2O} \cdot 10^3} = \frac{d_{\Gamma}}{0,804 \cdot 10^3} = \frac{d_{\Gamma}}{804}, \quad (1.2)$$

де $\rho_{H_2O}^{н.у}$ - густина водяної пари приведена до нормальних термодинамічних умов.

$$\rho_{H_2O}^{н.у} = \frac{\mu_{H_2O}}{22,4}, \quad (1.3)$$

μ_{H_2O} - молярна маса водяної пари, кг/кмоль ($\mu_{H_2O} = 18$ кг/кмоль);
22,4- об'єм який займає 1 кмоль будь-якого газу за нормальних термодинамічних умов, $м^3$.

Підставляючи вираз (1.2) в (1.1), отримаємо

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \frac{d_{\Gamma}}{804}} = \frac{804}{804 + d_{\Gamma}}, \quad (1.4)$$

Що означає число 804?

$$\rho_{H_2O}^{н.у} = \frac{\mu_{H_2O}}{22,4} = \frac{18}{22,4} = 0,804 \frac{кг}{м^3_{H_2O}} = 804 \frac{г}{м^3_{H_2O}}, \text{ тобто це густина}$$

водяної пари за нормальних термодинамічних умов.

Значення густина водяної пари підставляється в $\frac{2}{3}$, тому що одиниця виміру вологовмісту газу d_{Γ} , $\frac{г}{м^3}$.

ниці виміру вологовмісту газу d_{Γ} , $\frac{г}{м^3}$.

Приклад 4.

Виконати перерахунок складу сухого газоподібного палива на вологий газ, якщо $d_{\Gamma} = 8 \frac{г}{м^3}$

Задано

$$CH_4 = 96,5\%;$$

$$C_2H_6 = 0,41\%;$$

$$C_3H_8 = 0,19\%;$$

$$C_4H_{10} = 0,12\%;$$

$$CO_2 = 0,11\%;$$

$$N_2 = 2,67\%;$$

Розв'язання

1. Перевіряємо правильність

$$\text{завдання складу } \sum_{i=1}^6 V_i = 100\%$$

2. Коефіцієнт перерахунку

$$K_{\Gamma} = \frac{804}{804 + d_{\Gamma}} = \frac{804}{804 + 8} = 0,99$$



3. Склад вологого газу

$$CH_4^{6.l} = CH_4^c \cdot K_{\Gamma} = 96,5 \cdot 0,99 = 95,535\%$$

$$C_2H_6^{6.l} = C_2H_6^c \cdot K_{\Gamma} = 0,41 \cdot 0,99 = 0,406\%$$

$$C_3H_8^{6.l} = C_3H_8^c \cdot K_{\Gamma} = 0,19 \cdot 0,99 = 0,188\%$$

$$C_4H_{10}^{6.l} = C_4H_{10}^c \cdot K_{\Gamma} = 0,12 \cdot 0,99 = 0,119\%$$

$$CO_2^{6.l} = CO_2^c \cdot K_{\Gamma} = 0,11 \cdot 0,99 = 0,109\%$$

$$N_2^{6.l} = N_2^c \cdot K_{\Gamma} = 2,67 \cdot 0,99 = 2,643\%$$

Сумуємо 99,00%

Тоді

$$H_2O = 100 - 99,00 = 1,00\%.$$

Склад вологого газу

$$CH_4 = 95,535\%;$$

$$C_2H_6 = 0,406\%;$$

$$C_3H_8 = 0,188\%;$$

$$C_4H_{10} = 0,119\%;$$

$$CO_2 = 0,109\%;$$

$$N_2 = 2,643\%;$$

$$H_2O = 1,00\%;$$

100,0%.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Склад вологого газу можна заокруглити, див.табл.1.4

Таблиця 1.4

Склад газоподібного палива

Не заокруглений склад	Остаточний склад
$CH_4 = 95,535\%$	95,6%
$C_2H_6 = 0,406\%$	0,4%
$C_3H_8 = 0,188\%$	0,2%
$C_4H_{10} = 0,119\%$	0,1%
$CO_2 = 0,109\%$	0,1%
$N_2 = 2,643\%$	2,6%
$H_2O = 1,00\%$	1,0%
$\Sigma = 100,0\%$	$\Sigma = 100,0\%$



1.4. Теплота згоряння твердого (рідкого), газоподібного палива та її визначення

Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці маси або об'єму палива, називають *теплотою згоряння*.

Розрізняють *вищу* Q_v^p і *нижчу* Q_n^p теплоту згоряння палива. Теплоту можна відносити до робочої маси Q_n^p , до органічної Q_n^o , до сухої Q_n^c , до горючої Q_n^s . Найбільш повне уявлення дає теплота згоряння віднесена до робочої маси палива Q_n^p і Q_v^p .

Нижча теплота згоряння палива Q_n^p не враховує теплоту конденсації водяних парів, які знаходяться в продуктах згоряння палива, а вища теплота згоряння Q_v^p враховує

Теплота конденсації виділяється тоді, коли продукти згоряння палива, які містять водяну пару, конденсуються, що досягається за рахунок їхнього охолодження нижче температури точки роси (нижче температури початку конденсації). При охолодженні продуктів згоряння до 0°C уся теплота від конденсації H_2O передається продуктам згоряння палива. Необхідно пам'ятати, що для більшості теплотехнологічних установок продукти згоряння палива не охолоджуються до температури конденсації водяних парів, а тому досить часто доводиться мати справу з нижчою теплотою згоряння палива.

Нижча теплота згоряння твердого (рідкого) палива визначається за формулою Д.І. Менделєєва, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$Q_n^p = 340 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (W^p - S^p) - 25,16 \cdot W^p, \quad (1.5)$$

У формулу 1.5 значення компонентів підставляються в %.

Вивід вищої теплоти згоряння твердого(рідкого) палива Q_v^p :

Вища теплота згоряння твердого(рідкого) палива рівна

$$Q_v^p = Q_n^p + Q_{\text{конд}}, \quad (1.6)$$

де $Q_{\text{конд}}$ - теплота конденсації водяних парів

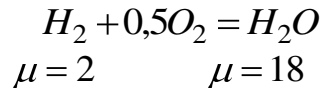
При визначенні вищої теплоти згоряння, необхідно пам'ятати, що при конденсації 1 кг водяної пари виділяється 2516 кДж теплоти. Водяна пара в продуктах згоряння палива складається з вологи,



яка міститься у твердому (рідкому) паливі W^P , та вологи, яка утворюється в результаті згоряння водню H^P .

$$Q_{\text{конд}} = Q_{\text{конд}}^{H^P} + Q_{\text{конд}}^{W^P}, \quad (1.7)$$

При цьому масова доля водяної пари H_2O в продуктах згоряння більше, чим вміст водню H_2 , в 9 разів, що видно з реакції горіння водню



В результаті отримаємо

$$Q_{\text{конд}}^{W^P} = 2516 \cdot \frac{W^P}{100} = 25,16 \cdot W^P; \quad Q_{\text{конд}}^{H^P} = 2516 \cdot \left(\frac{9 \cdot H^P}{100} \right) = 25,16 \cdot 9H^P.$$

Отже, остаточно маємо

$$Q_v^P = Q_n^P + 25,16 \cdot 9H^P + 25,16 \cdot W^P = Q_n^P + 25,16 \cdot (9H^P + W^P), \quad (1.8)$$

Нижча теплота згоряння газоподібного палива обчислюється за формулою

$$Q_n^P = \sum_{i=1}^n Q_{\text{екз. } i} \cdot r_{i \text{ n-ва}} = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\text{екз. } i} \cdot V_{i \text{ n-ва}}, \quad (1.9)$$

де $Q_{\text{екз. } i}$ - екзотермічний ефект реакції горіння, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$;

$Q_{\text{екз. } i}$ - визначається за таблицями для даного горючого компо-

нента палива;

$r_{i \text{ n-ва}}$ - об'ємна доля i -го компонента палива;

$V_{i \text{ n-ва}}$ - вміст i -го компонента який входить у склад газоподібного

го палива, %, $\left(\frac{\text{м}^3}{100\text{м}^3} \right)$

Формула (1.9) враховує лише горючі компоненти газоподібного палива.

Для визначення вищої теплоти згоряння газоподібного палива Q_v^P спочатку виконують розрахунок горіння палива при $\alpha = 1,0$; повітря вологе; паливо вологе і визначають теоретичну кількість водяної пари, яка утворилася в результаті повного згоряння одиниці



об'єму палива $V_{H_2O}^o$ пр.зг $\left(\frac{M^3_{н H_2O}}{M^3_{н п-ва}} \right)$.

Обчислюється $Q_{\text{в}}^p$ для газоподібного палива за формулою

$$Q_{\text{в}}^p = Q_{\text{н}}^p + Q_{\text{конд}}, \quad (1.10)$$

де $Q_{\text{конд}} = 2516 \cdot V_{H_2O}^o$ пр.зг $\cdot \rho_{H_2O}^{\text{н.у}}$,

$\rho_{H_2O}^{\text{н.у}}$ - густина водяної пари за нормальних термодинамічних умов.

$$\rho_{H_2O}^{\text{н.у}} = \frac{\mu_{H_2O}}{22,4} = \frac{18}{22,4} = 0,804 \left(\frac{\text{кг } H_2O}{M^3_{н п-ва}} \right).$$

$$Q_{\text{конд}} \left(\frac{\text{кДж} \cdot M^3_{н H_2O} \cdot \text{кг}_{H_2O}}{\text{кг}_{H_2O} \cdot M^3_{н H_2O} \cdot M^3_{н п-ва}} \right) = \left(\frac{\text{кДж}}{M^3_{н п-ва}} \right);$$

$$Q_{\text{конд}} = 2516 \cdot V_{H_2O}^o$$
 пр.зг $\cdot 0,804 = 2023 \cdot V_{H_2O}^o$ пр.зг, (1.11)

Отже, остаточно отримаємо

$$Q_{\text{в}}^p = Q_{\text{н}}^p + 2023 \cdot V_{H_2O}^o$$
 пр.зг, (1.12)

Досить часто на підприємствах виникає необхідність спалювати різні види палива одночасно. Наприклад, доменний та коксовий газ, природний газ додають до коксового або доменного, тверде або рідке паливо- до природного газу для збільшення яскравості факела і т.д. Виникає необхідність визначення складу суміші та теплоти її згоряння.

Для суміші двох твердих, твердого і рідкого палива або двох газоподібних палив

$$Q_{\text{нсум}}^p = b_1 \cdot Q_{\text{н1}}^p + (1 - b_1) Q_{\text{н2}}^p, \quad (1.13)$$

де $Q_{\text{н1}}^p$ і $Q_{\text{н2}}^p$ - теплота згоряння відповідно першого та другого палива у суміші, кДж/кг.

Для суміші твердого або рідкого палива з газоподібним паливом розрахунок проводиться для 1 кг твердого або рідкого палива з врахуванням кількості газоподібного палива:

$$Q_{\text{нсум}}^p = Q_{\text{н1}}^p + n \cdot Q_{\text{н2}}^p, \quad (1.14)$$



де $Q_{н\text{сум}}^p$ - умовна теплота згоряння суміші, кДж/кг ;

$Q_{н1}^p$ - теплота згоряння твердого або рідкого палива, кДж/кг ;

$Q_{н2}^p$ - теплота згоряння газоподібного палива, кДж/м^3 ;

n - кількість газоподібного палива, яке відповідає 1 кг твердого або рідкого палива, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Витрата палива на вогнетехнічну установку залежить від її теплоти згоряння, яка може змінюватись у широких межах. Для порівняння теплової і енергетичної цінності та ефективності використання різних видів палива, використовують поняття- *умовне паливо*. Умовним паливом називають паливо, теплота згоряння якого прийнята рівною 29300 кДж/кг .

Для перерахунку натурального палива в умовне, використовують *тепловий еквівалент* палива

$$E = \frac{Q_n^p}{29300}, \quad (1.15)$$

Витрата умовного палива визначається за формулою

$$B_y = B \cdot E, \quad (1.16)$$

де B - витрата натурального палива, кг/с .

1.5. Приведені характеристики палива

Говорячи про приведені характеристики твердого палива, перш за все необхідно підкреслити доцільність введення поняття приведених величин. Одна і та ж кількість двох різних видів палива може містити різну кількість вологи, золи та сірки, але виділяти при згорянні однакову кількість теплоти. Тому не можна говорити, що паливо з високою масовою концентрацією вологи, золи або сірки має меншу теплоту згоряння. Для оцінки впливу золи, вологи і сірки на процес горіння твердого (рідкого) палива (від їх кількості залежать температури горіння палива, корозійна активність продуктів згоряння та інші) вводять поняття *приведених характеристик*..

Оцінка впливу золи, вологи і сірки на роботу установки визначається кількістю згаданих компонентів, які припадають на одиницю питомої теплоти згоряння, наприклад на 1 МДж теплоти. Такі характеристики палива, тобто відношення золи, вологи і сірки до 1 МДж нижчої теплоти згоряння отримали назву *приведених хара-*



ктеристик.

$$W^{\Pi} = \frac{10 \cdot W^P}{Q_H^P}; \quad A^{\Pi} = \frac{10 \cdot A^P}{Q_H^P}; \quad S^{\Pi} = \frac{10 \cdot S^P}{Q_H^P},$$

де W^P , A^P , S^P – вміст вологи, золи, і сірки в перерахунку на робочу масу палива, % або $кг/100 кг_{n-ва}$;

Q_H^P - нижча теплота згоряння палива, $МДж/кг$.

Значення $10 \cdot W^P$ буде визначати масу вологи в грамах (наприклад, якщо $W^P = 10\%$, то $10 \cdot W^P = 10 \cdot 10 = 100 г$ вологи припадає на $1 кг$ палива); аналогічно визначають масу золи та сірки, яка припадає на $1 кг$ палива. Отже, одиниця величин W^{Π} , A^{Π} та S^{Π} в $г \cdot кг / МДж$ показує масу вологи, золи та сірки, яка припадає на одиницю теплоти, яка виділилась при згорянні одиниці палива.

Необхідно відмітити, що при приведеній зольності

$A^{\Pi} \leq 1$ – мають місце малозольні палива (антрацит, кам'яне вугілля);

$1 < A^{\Pi} \leq 4$ – мають місце середньозольні палива (буре вугілля);

$4 < A^{\Pi} \leq 8$ – мають місце високозольні палива (горючі сланці);

$A^{\Pi} \leq 0,01$ – для рідкого палива (нафта, мазут).

При приведеній вологості:

$W^{\Pi} < 0,75$ – мають місце маловологі палива (антрацит, кам'яне вугілля);

$0,75 < W^{\Pi} \leq 2$ – мають місце середньовологі палива (буре вугілля, горючі сланці);

$W^{\Pi} > 2$ – мають місце високовологі палива (більшість бурого вугілля);

$W^{\Pi} < 0,1$ – для рідкого палива.

При приведеній сірчистості:

$S^{\Pi} \leq 0,05$ – мають місце малосіркові палива (мазут, нафта);

$0,5 < S^{\Pi} \leq 3,5$ – мають місце сіркові палива (мазут, нафта);

$S^{\Pi} > 3,5$ – мають місце високосіркові палива (мазут, нафта);

$S^{\Pi} \geq 0,2$ – для твердого палива.

Запитання для самоконтролю.

1. Дайте визначення поняття “паливо” та “горіння”.
2. Які вимоги висуваються до речовин які можуть бути використані в якості палива?
3. Класифікація палива.
4. Для чого вводиться поняття умовне паливо?



5. Які є способи добування твердого, рідкого та газоподібного палива?
6. Які є способи термічної переробки твердого та рідкого палива?
7. На що впливає вміст вологи у паливі?
8. Отримати коефіцієнт перерахунку з горючої маси твердого палива на робочу, суху та органічну.
9. Отримати коефіцієнт перерахунку складу сухого газоподібного палива на вологий газ.
10. Пояснити фізичну суть відмінності між вищою та нижчою теплотою згоряння палива.
11. Методика складання залежності для визначення вищої теплоти згоряння твердого (рідкого) та газоподібного палива.
12. Що характеризує приведена вологість палива?





2. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО, РІДКОГО ТА ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

2.1. Фізико-технічні характеристики твердого палива

Для твердого палива основними показниками є: гранулометричний склад, температура плавлення золи, вологість, густина, сипучість, замерзання, механічна міцність, вибухонебезпечність, схильність до самозапалення та інші.

Температура плавлення золи – одна із основних властивостей твердого палива, оскільки вона визначає принципи його спалювання. По температурі плавлення золу поділяють на чотири групи:

Плавкість золи визначають фіксуванням зміни геометричної форми тригранної піраміди висотою 13 мм, з основою у вигляді рівностороннього трикутника зі стороною 6 мм, причому одна з граней піраміди перпендикулярна до її основи. По температурі плавлення золу поділяють на чотири групи:

- *легкоплавка* (температура плавлення до 1250 °C) – утворюється в тонких монолітних конгломератах у вигляді пористого шлаку;
- *середньоплавка* (температура плавлення 1250 – 1350 °C);
- *тугоплавка* (температура плавлення 1350 – 1500 °C);
- *вогнетривка* (температура плавлення більше 1500 °C).

В рідкому стані золу називають *шлаком*, причому в'язкість шлаку при збільшенні температури зменшується, а текучість збільшується. Хімічні властивості золи та шлаку мають значний вплив на межу стійкості вогнетривких матеріалів

Гранулометричний склад – це кількісне розподілення шматків по величині, які знаходяться в паливі. Величина шматка визначається розміром d_{cp} . Це середньоарифметичне або середньгеометричне значення трьох розмірів: довжини l , ширини b і висоти h . Найбільш точне значення дає формула

$$d_{cp} = \sqrt[3]{l \cdot b \cdot h}, \quad (2.1)$$

Тверде паливо може бути *сортованим* і *рядовим*. Сортоване паливо – це паливо, яке перед його спалюванням пройшло попереднє сортування по величині. Для цього палива має місце відношення $d_{max} / d_{min} \leq 2,5$. До рядового палива відноситься паливо, яке не



пройшло попереднє сортування, для нього $d_{\max} / d_{\min} > 2,5$. гранулометричний склад визначається шляхом просіювання палива через сито з квадратними отворами із різних діаметрів: 150, 100, 50, 25, 13, 6, 3 і 0,5 мм, і виражається або відсотковим вмістом шматків між двома розмірами сит, або аналізом по залишкам на ситі. Наприклад, в такому-то вугіллі шматків класу 50...10 мм міститься 18% або залишок на ситі з розмірами 50×50 мм складає 78%. Розрізняють сорт і марку вугілля. Для прикладу приведемо маркування антрациту (дивись табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Маркування антрациту

Сорт	Марка	Розмір шматків, мм
Плита	АП	Більше 100
Кулак	АК	50...100
Горіх	АО	25...50
Дрібний	АМ	13...25
Зернятко	АС	6...13
Штиб	АШ	менше 6
Рядовий без плити	АРШ	менше 100

Вологість твердого палива може бути:

1. *Адсорбційна* – утримується паливом в атмосфері, насиченій водяною парою. Кількість залежить від хімічного віку. Чим більший хімічний вік, тим менше адсорбційної вологи містить паливо.
2. *Волога набухання* – волога, яку вбирають колоїдні компоненти палива. При її втраті виникає усадка палива. Ця волога властива лише молодому паливу (торф, лігніт, деяке буре вугілля).
3. *Капілярна волога* – в капілярах і порах палива. Характерна молодому паливу.
4. *Механічна волога* – утримується паливом на поверхні після його змочування і наступного стікання. Кількість її залежить від вологовмісту (кількість вологи, яку паливо здатне втримати після змочування і вільного стікання). Дрібні фракції палива мають велику вологоємність, так як поверхня палива більша.
5. *Гідратна вологість* – волога, яка входить в склад кристалів мінеральних домішок (гіпс, каолінит і ін.).
6. *Гігроскопічна вологість* – волога, яка міститься в аналітичній пробі палива, доведеного до повітряно-сухого стану при температурі 20 °С і відносній вологості повітря 65 %.



Повітряно-сухим називається паливо із встановленою вологою при тривалому зберіганні його на повітрі при умові захисту його від атмосферних опадів.

Об'ємна вага палива – відношення маси палива, вільного засипаного в мірний посуд, до об'єму цього посуду. *Об'ємна вага динамічно ущільненого палива* – відношення маси палива, засипаного в мірний посуд і, ущільненого шляхом неодноразового струшування посуду, до об'єму цього посуду.

Коефіцієнт динамічного ущільнення (K_y) – визначається як відношення об'ємної ваги ущільненого палива до об'ємної ваги вільно насипаного палива ($K_y > 1,0$).

Сипучість палива – під цим поняттям розуміють рухомість його частинок. На рухомість частинок впливають сили тертя, які виникають за рахунок тиску верхніх шарів палива на нижні. Розрізняють коефіцієнт внутрішнього тертя ξ_1 і коефіцієнт зовнішнього тертя ξ_2 (опір переміщенню палива по твердій поверхні).

Значення ξ_1 і ξ_2 залежать від відносної вологості палива φ . До значення $\varphi \approx 40\%$: $\xi_1 \approx 0,8$, $\xi_2 \approx 0,4$ практично постійні, а зі збільшенням φ різко збільшуються.

Сипучість палива характеризується також кутом природного відхилення. Розрізняють *статичний* і *динамічний* кут природного відхилення (див. рис. 1).

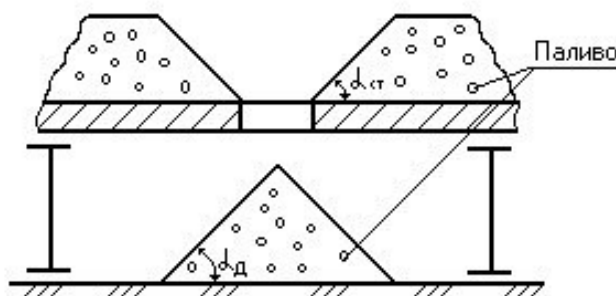


Рис. 2.1. Визначення статичного $\alpha_{ст}$ і динамічного $\alpha_{д}$ кутів природного відхилення

Статичний кут природного відхилення характеризує сипучі властивості палива значно краще, ніж динамічний. При вологості повітря до $\varphi \approx 40\%$ статичний кут збільшується ненабагато, а потім швидко зростає і досягає 90° , що говорить про повну відсутність сипучості. Вміст золи в паливі погіршує його сипучість. При тривалому зберіганні твердого палива в бункерах різко погіршується



його сипучість.

Замерзання – властивість вологого палива при низьких температурах перетворюватись в великі шматки (глиби). Замерзле паливо не сипуче. Встановлено, що у всіх видів твердого палива волога, яка міститься в ньому, змерзається при температурі від мінус 2°C до плюс 4°C . Але в лід перетворюється тільки частина вологи, а решта вологи знаходиться в переохолодженому стані навіть при мінус 40°C , мінус 50°C . Вологість палива, яка відповідає вмісту в ньому лише незамерзаючої вологи, називається *безпечною*. Величина безпечної вологості залежить від вмісту в паливі золи і від складу. Наприклад, підвищення зольності у бурому вугіллі понижає значення безпечної вологості. Зола, що міститься в кам'яному вугіллі може і зменшувати і збільшувати значення безпечної вологості. Для запобігання замерзання твердого палива перед транспортуванням його необхідно підсушити.

Механічна міцність – властивість палива протистояти руйнуючим силам. Найбільш міцним є кам'яне вугілля, менш міцне буре вугілля і горючі сланці. Ми розглянемо механічну міцність з точки зору його подрібнення перед спалюванням. Критерієм цієї оцінки являється *лабораторний відносний коефіцієнт подрібнювальної здатності* $K_{\text{П}}$. Під лабораторним відносним коефіцієнтом подрібнювальної здатності розуміють відношення витрати енергії при розмолі еталонного палива до палива, яке розглядається, при їх повітряно-сухому стані, подрібнені від однакової крупності до однієї і тієї ж тонкості помолу. Отже, можна записати

$$K_{\text{П}} = \frac{E_{\text{ЕТ}}}{E_{\text{Р}}}, \quad (2.2)$$

де $E_{\text{ЕТ}}$ – витрата енергії при подрібненні еталонного палива;

$E_{\text{Р}}$ – витрата енергії при подрібненні палива яке розглядається.

За еталонне паливо прийняте вугілля марки АШ. У більшості випадків для дуже твердого палива $K_{\text{П}} < 1$, а у менш твердих $K_{\text{П}} > 1$ і зростає з пониженням твердості палива. Величина $K_{\text{П}}$ впливає на знос робочих елементів подрібнювачів, грохотів, стрічок конвеєрів, стінок бункерів. Наявність в паливі піску, колчедану, твердих порід приводить до негативного впливу на механічну міцність.

Кородуюча дія палива – здатність палива викликати корозію по-



верхонь (сталених стінок, рукавів, бункерів і ін.), які контактують з даним паливом. До кородуючого палива відноситься буре вугілля, горючі сланці, торф. При наявності в паливі сірки і сірчаного колчедану кородуюча дія палива зростає.

Вибухонебезпечність – властивість твердого палива швидко запалюватись з вибухом. Вибухонебезпечними є торф'яний і сланцевий пил, а також пил бурого і кам'яного вугілля, які містять більше 25% летких речовин в перерахунку на горючу масу твердого палива. Вибух пилу може бути як у приміщенні так і в бункерах. При зупинці агрегатів, які працюють на пилевидному паливі, необхідно повністю використати паливо яке знаходиться у бункерах, а в приміщенні необхідно провести вологе прибирання горизонтальних поверхонь і місць, де може осаджуватися пилевидне паливо.

2.2. Фізико-технічні характеристики рідкого палива

Основними характеристиками мазуту є в'язкість, густина, температура спалаху, запалення, самозапалення і загусання.

В'язкість мазуту – характеризує внутрішнє тертя речовини, розрізняють коефіцієнт динамічної в'язкості μ (Па·с) та кінематичної в'язкості ν (м²/с). Зв'язок між коефіцієнтами динамічної та кінематичної в'язкості

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.3)$$

де ρ - густина речовини, за нормальних термодинамічних умов, кг/м³.

На практиці часто користуються так званою *умовною в'язкістю* (°УВ– градус умовної в'язкості). Визначається умовна в'язкість наступним чином: із колби місткістю 200 мл виливають дистильовану воду при 20°С, а потім – мазут. Відношення часу витікання мазуту до часу витікання води і буде умовною в'язкістю (°УВ > 1,0).

При збільшенні температури в'язкість мазуту зменшується, а при збільшенні тиску в'язкість мазуту збільшується, однак в області робочих тисків цією зміною можна знехтувати.

Перед розпилюванням мазуту через форсунки, мазут попередньо підігрівають до температури 110–120°С. В'язкість мазуту впливає на затрати енергії при його транспортуванні по мазутопроводам.



Густина мазуту – це маса речовини яка знаходиться в одиниці об'єму, ($\text{кг} / \text{м}_n^3$). Густина залежить від температури, зі збільшення температури густина мазуту зменшується. Для наближеного визначення густини можна користуватися формулою Д. І. Менделєєва

$$\rho_t = \rho_{20} - \alpha(t - 20), \quad (2.4)$$

де α - поправка на зміну густини на 1°C ($\alpha = 0,0005 \dots 0,0006$).

На практиці часто користуються *відносною густиною* (відношення густини мазуту при даній температурі до густини дистильованої води при температурі 4°C). Густина мазуту прямої гонки менша 1,0. При $\rho_m < 1,0$ мазут знаходиться поверх води, а при $\rho_m > 1,0$ – нижче (при цьому відстоювання води не виникне).

Температура спалаху – це температура, при якій пари палива (мазуту), яке підігривають, спалахують при наявності зовнішнього джерела полум'я. Горіння при цьому не виникає (лише спалах). Якщо паливо продовжує нагріватись, то виникає запалення парів і вони горять не менше 5 секунд – цю температуру називають *температурою запалення палива* (верхня межа температури спалаху). Темпера спалаху і запалення залежать від температури кипіння. Чим нижча температура кипіння, тим нижча температура спалаху і запалення. Температура спалаху бензину менше 0°C , до -40°C . Температура спалаху нафти коливається від 20°C до 40°C , а температура спалаху прямогонних мазутів $140 - 230^\circ\text{C}$. Температура запалення мазуту на $50 - 70^\circ\text{C}$ вища температури спалаху.

Температура самозаймання – це температура, при якій рідке паливо займається без наявності зовнішнього джерела полум'я. Для мазутів температура самозаймання $500 - 600^\circ\text{C}$.

Температура застигання – це така температура, при якій рідина (паливо) втрачає рухомість. При досягненні температури застигання мазут, що знаходиться в пробірці, нахилений під кутом в 45° залишається нерухомим на протязі однієї хвилини. Мазут має температуру застигання $40 - 42^\circ\text{C}$. Температура застигання зменшується зі зменшенням густини і збільшується зі збільшенням в'язкості.

Детонація – це процес вибухоподібного горіння палива, який супроводжується нестійкою роботою двигуна, зменшенням потужності та руйнуванням деталей.



2.3. Фізико-технічні характеристики газоподібного палива

Газоподібне паливо характеризується густиною, в'язкістю, токсичністю і ін. *Густина* – це маса одиниці об'єму, основний показник газоподібного палива. За нормальних термодинамічних умов густина газоподібного палива визначається за формулою

$$\rho_{\Gamma}^{ny} = \frac{\mu_{\Gamma}}{22,4}, \quad (2.5)$$

де μ_{Γ} - молярна маса газу, $кг/кмоль$.

Даною залежністю можна користуватись до ізобарного тиску газу $P_{над} \leq 1,2 МПа$. Густиною газової суміші можна визначити за формулою

$$\rho_{\Gamma см} = \sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i}^{ny} \cdot r_{\Gamma i}, \quad (2.6)$$

де $r_{\Gamma i}$ - об'ємна доля i -го компонента газу в суміші;

n – кількість компонентів у суміші.

На практиці зручно користуватися відносною густиною

$$S = \frac{\rho_{\Gamma}^{ny}}{\rho_{вх}^{ny}}, \quad (2.7)$$

де $\rho_{вх}^{ny}$ - густина повітря за нормальних термодинамічних умов

$$\left(\rho_{вх}^{ny} = \frac{\mu_{вх}}{22,4} = \frac{28,96}{22,4} = 1,293 \frac{кг}{м^3} \right).$$

Якщо $S < 1$ то газ буде скупчуватися в верхній частині зайнятого об'єму (приміщення), а якщо $S > 1$ – в нижній частині.

Густина газу зі збільшенням температури підвищується на відміну від рідин.

Температура кипіння – це температура, при якій пружність парів над поверхнею рідини рівна зовнішньому тиску, тобто це температура рівноваги між рідкою та паровою фазами при даному тиску.

Температура самозаймання – це процес самостійного займання одночасно всього об'єму горючої суміші при нагріві її до певної температури. Точно аналітично розрахувати температуру самозаймання природного газу неможливо, хоча температури самозаймання його компонентів відомі. Можна прийняти, що згадана температура знаходиться біля температур самозаймання його компонентів; для більшості природних газів вона знаходиться в межах



від 600°C до 800°C .

Температура займання – це така температура при досягненні якої відбувається процес займання горючої суміші в точці дії високотемпературного джерела полум'я з наступним самостійним розповсюдженням полум'я по всьому об'єму.

Молекулярна маса – це сума атомних мас елементів, які входять у склад молекули.

Коефіцієнт динамічної в'язкості – характеризує внутрішнє тертя газу, яке обумовлене внутрішньомолекулярним станом, завдяки якому в газі, який рухається виникають сили тертя за рахунок деформації елементарних об'ємів.

Для газової суміші коефіцієнт динамічної в'язкості можна визначити за формулою Манна

$$\mu = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i}}, \quad (2.8)$$

де m_i – масові долі компонентів газу, які входять у газову суміш, %;

μ_i – коефіцієнти динамічної в'язкості компонентів газової суміші, $\text{Па} \cdot \text{с}$

З збільшенням температури в'язкість газу збільшується, для наближеного визначення в'язкості газу можна використовувати формулу Сутерленда

$$\mu_t = \mu \frac{273,15 + a}{273,15 + a + t} \cdot \left(\frac{273,15 + t}{273,15} \right)^{1,5}, \quad (2.9)$$

де a – емпіричний коефіцієнт, який залежить від природи газу, значення емпіричного коефіцієнту: метан-162, етан-226, пропан-278, бутан-336, азот-107, пентан-377, окис вуглецю-250.

Зв'язок між коефіцієнтами динамічної та кінематичної в'язкості визначають за залежністю (2.3).

Нижня концентраційна межа займання газоповітряних сумішей – має дуже важливе значення в питанні спалювання газу, для суміші горючих газів може бути визначена за формулою Ле Шатальє

$$N_n = \frac{205 \cdot 10^3}{Q_g^2}, \quad (2.10)$$

де Q_g^2 – вища теплота згоряння горючої частини суміші, $\text{кДж} / \text{м}_n^3$.



- для суміші горючих газів без баласту

$$N_{\text{сум}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{N_i}}, \quad (2.11)$$

де r_i – об’ємна доля i -го горючого компонента газової суміші;

N_i – межа займання i -го горючого компонента газової суміші.

- для суміші горючих газів з баластом

$$N_{\text{сум}}^B = N_{\text{сум}} \frac{\left(1 + \frac{B}{100 - B}\right) \cdot 100}{100 + N_{\text{сум}} \cdot \frac{B}{100 - B}}, \quad (2.12)$$

де B – вміст баластних домішок у газовій суміші, у % (по об’єму).

Межа займання розширюється з збільшенням температури, при нагріві суміші вище температури самозаймання горючі компоненти суміші вступають в реакцію з киснем незалежно від їх співвідношення.

Токсичність – велика кількість горючих газів містить токсичні компоненти: сірководень (H_2S) – це газ без кольору з сильним запахом, важчий за повітря (густина – $\rho = 1,54 \text{ кг/м}^3$), дуже отруйний – при концентрації сірководню більше 1 мг/л смертельне отруєння може відбутися майже миттєво від паралічу дихальних шляхів, а тому допустима концентрація його в повітрі приміщень має бути не більше $0,01 \text{ мг/л}$, а в газі який поступає в міські газові мережі, – не більше 2 гр на 100 м^3 газоподібного палива; окис вуглецю (CO) – хімічно стійкий горючий газ, який не має кольору, густина – $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ при концентрації в повітрі в 1% призводить через 1–2 хв до сильного отруєння та смерті. Гранична концентрація CO в повітрі робочої зони не більше $0,03 \text{ мг/л}$ при тривалій роботі та не більше $0,05 \text{ мг/л}$ при перебуванні у загазованій атмосфері до 1 год. Окис вуглецю є продуктом неповного горіння вуглецю і може знаходитись в продуктах згорання будь-якого палива, яке містить вуглець або з’єднання які містять вуглець; сірководень (CS_2) в невеликій кількості входить в склад газів, які отримують шляхом сухого гоніння палив, які містять сірку. Пари CS_2 в 2,6 раз важче повітря. Високі концентрації парів сірководню в повітрі приводять до отруєння, гранично допустима концентрація в робочій зоні



0,01 мг/л; ціаністий водень (HCN) – сильна отрута, яка міститься у невеликій кількості в газах сухого гоніння палив, граничний вміст HCN в газах, які використовуються з метою газопостачання міст, не більше 0,05 мг/л причому гранично допустима концентрація в повітрі промислових підприємств 0,0003 мг/л; метан (CH₄) не отруйний, проте при вмісті його в повітрі 30 % по об'єму настає задушливість в зв'язку з недостатком кисню для дихання.

2.4. Коротка характеристика та маркування окремих видів палива

Вугілля. Поділяється на три основні види: буре вугілля, кам'яне та антрацит.

До бурого вугілля (маркується літерою *Б*) відноситься вугілля із вищою теплотою згорання до 24000 кДж/кг. Воно має незначну механічну міцність, вміст сірки до 4 %, золи і шлаків до 30 %, горючих летких речовин до 30–40 %, схильне до самозаймання. По вмісту робочої вологи поділяється на три групи: *Б1* – вміст вологи більше 40 %, *Б2* – від 30 до 40 %, *Б3* – менше 30 %.

Кам'яне вугілля (не має окремо виділеної літери для маркування) має вищу теплоту згорання більшу 24000 кДж/кг і вихід горючих летких речовин більше 9 %, має високу механічну міцність і не схильне до самозаймання.

В залежності від виходу горючих летких речовин V^G , спікання та характеру коксового залишку паливо поділяють по марках: довгополум'яне (маркується літерою *Д*) – $V^G > 37\%$, газове (*Г*) – $V^G > 37\%$, газове жирне (*ГЖ*) – $V^G = 23-37\%$, жирне (*Ж*) – $V^G = 27-37\%$, коксове жирне (*КЖ*) – $V^G = 25-31\%$, коксове (*К*) – $V^G = 18-27\%$, коксове друге (*К2*) – $V^G = 17-25\%$, спісніле спікливе (*ОС*) – $V^G = 14-22\%$, малоспікливе (*СС*) – $V^G = 17-37\%$, пісне (*Т*) – $V^G < 17\%$, напівантрацитне (*ПА*) – $V^G < 10\%$, антрацит (*А*) – $V^G < 8\%$.

Антрацит (маркується літерою *А*) до нього відносять вугілля із виходом горючих летких речовин менше 9 %, теплота згорання 25500 – 29700 кДж/кг. На великих електростанціях використовують



антрацит $AШ$ з $A^P \leq 20\%$ і $W^P = 5-10\%$.

Умовне позначення наприклад: $AШ$ – антрацит «штиб», $B2K$ – буре вугілля $B2$ «кулак», TP – «пісне» кам'яне вугілля «рядове», та для сумішей $АСШ$ – антрацит «зернятко» зі «штибом».

Кокс – це продукт високотемпературної термічної обробки кам'яного вугілля без доступу повітря. Кокс висококалорійний, міцний, термостійкий не схильний до самозаймання. Для отримання коксу використовують тільки вугілля, яке коксується. В процесі коксування виділяються леткі горючі речовини (утворюється коксовий газ) і утворюється коксовий залишок – кокс. Кокс використовується у металургії та у виробництві будівельних матеріалів.

Горючі сланці – це продукт розкладання без доступу повітря під водою рослинних та тваринних залишків. Характеризується високим вмістом летких речовин до 80%, високою, зольністю ($A^P = 50-55\%$), вологістю ($W^P = 15-20\%$) та теплотою згорання 6000–9900 кДж/кг. Найбільш доцільним є використання горючих сланців для отримання штучного рідкого та газоподібного палива, та використовувати як місцеве паливо.

Торф – це також продукт розкладання без доступу повітря під водою рослинних та тваринних залишків. По способу добування розрізняють: торф коксовий (машинний та гідроторф) та фрезерний торф–крошка. Торф має високу вологість (до 50%) вміст горючих летких речовин (до 70%), високу зольність ($A^P = 15-20\%$), схильний до самозаймання та має низьку теплоту згорання 8500–15000 кДж/кг. Транспортування торфу економічно не доцільне і він використовується у якості місцевого палива та як добриво у сільському господарстві.

Дрова. Елементарний склад – клітчаті $(C_6H_{10}O_5)_n$. Деревина містить до 85% летких горючих речовин, в складі відсутня сірка, зольність (до 2%), вологість ($W^P = 30-60\%$), теплота згорання до 12600 кДж/кг. Деревину використовують у якості сировини для переробної промисловості, і це веде до зниження використання її в якості палива.

Нафта – рідке паливо, в якості палива не використовується, а є сировиною для подальшої переробки.

Мазут – остання фракція термічної переробки нафти. Теплота



згорання мазуту $38500 - 39000 \text{ кДж/кг}$ і по практичному вмісту сірки поділяється на малосірковий ($S^P \leq 0,5\%$), сірковий ($0,5 < S^P \leq 3,5\%$), і високосірковий ($S^P > 3,5\%$). Мазут має високий вміст вуглецю ($84 - 86\%$) і водню ($10 - 12\%$). Недоліком мазуту є його перехід при температурі менше $60 - 80^\circ\text{C}$ у в'язкий стан та необхідність його розігріву при транспортуванні та використанні.

Мазут поділяють на *флотський* і *топковий*. Флотський мазут – це суміш мазуту прямої гонки з тафтяними дистиллятами (використовуються для двигунів). Топковий мазут – це суміш мазуту прямої гонки з крекінг-мазутом, або просто мазут прямої гонки. Мазут маркується літерами *MT* (мазут топковий), *МП* (мазут мартенівський пічний) і *Ф* (мазут флотський) та числом, яке визначає в'язкість у градусах Енглера при температурі 50°C ($40, 100$ і т.д.), для мазуту флотського введено окреме визначення в'язкості. В'язкість і густина топкового мазуту вища, ніж флотського. Марки мазуту $\Phi 5$ і $\Phi 12$ – флотський, $M 40$ і $M 100$ – топковий.

Газоподібне паливо, особливо природний і попутний нафтопромисловий газ, має великі переваги у порівнянні з іншими видами палива: можливість легкого транспортування, горить без диму і сажі, легко змішується з повітрям, прості пристрої для спалювання, можливість автоматизації процесу горіння. Теплота згорання по сухій масі природного газу $34000 - 36000 \text{ кДж/м}_n^3$. До природних газів можна віднести і пропан-бутанові фракції, які добувають з газів нафтових та газоконденсатних місць скупчень. Теплота згорання їх залежить від співвідношення у суміші пропана і бутана та знаходиться в межах $90000 - 110000 \text{ кДж/м}_n^3$

Використовуються отримані різними способами штучні гази:

- *коксний газ* – це попутний продукт виробництва коксу (в його склад входить метан, водень, окис вуглецю та баласт), який отримують після вловлювання в спеціальній апаратурі компонентів, які цінні для хімічної промисловості, теплота згорання знаходиться в межах $15000 - 20000 \text{ кДж/м}_n^3$;

- *напівкоксний газ* – це попутний продукт виробництва коксу, який отримують після очистки та вловлювання вуглеводнів, які сконденсувалися, теплота згорання знаходиться в межах $20000 - 30000 \text{ кДж/м}_n^3$;



- *доменний(колошниковий) газ* – це газ який виділяється при виплавці чавуну в доменних печах, коли в результаті термічної дії дуття на кокс відбувається процес його газифікації (в його склад входить окис вуглецю, двоокис вуглецю, азот, незначна кількість водню та з'єднань вуглецю і водню), теплота згорання знаходиться в межах $3500 - 4000 \text{ кДж} / \text{м}_n^3$, в зв'язку з низькою теплотою згорання цей газ неекономічно транспортувати на значні відстані, а тому його використовують в межах металургійного комбінату: в котельні та з метою опалення коксових і нагрівальних печей;

- *генераторний газ* – це газ який отримують в спеціальних апаратах-газогенераторах в результаті термічної переробки твердого палива за наявності окислювача з наступним переводом всієї горючої частини палива в газ, теплота згорання знаходиться в межах $15000 - 17000 \text{ кДж} / \text{м}_n^3$, його можна транспортувати на відстані $100 - 120 \text{ км.}$;

- *водяний газ* – отримують в результаті взаємодії водяних парів та розпеченого коксу (в його склад входить окис вуглецю, водень, двоокис вуглецю, водяна пара), теплота згорання знаходиться в межах $8500 - 12000 \text{ кДж} / \text{м}_n^3$, він не знайшов застосування в якості промислового палива, а використовується як хімічна сировина з високим вмістом водню або як паливний газ для деяких спеціальних технологічних апаратів;

- *крекінг-газ* – це побічний продукт крекінгу рідкого палива, який супроводжується інтенсивним розпадом молекул водню та вуглецю, які входять у склад цього палива, в результаті цього значна частина молекул утворює газову суміш (в її склад входять вуглеводні та баластні гази), теплота згорання крекінг-газу $60000 - 80000 \text{ кДж} / \text{м}_n^3$, він є цінною хімічною сировиною та використовується як паливо для промислових печей та котельних установок. Кількість таких газів в залежності від технологічного процесу переробки та властивостей сировини знаходиться в межах від 40 до 250 м^3 на тону вихідного палива. При переробці нафти яка містить сірчисті з'єднання в крекінг-газі буде міститись значна кількість сірководню і він буде цінною хімічною сировиною, а також його можна використовувати як паливо для промислових печей та котельних установок.

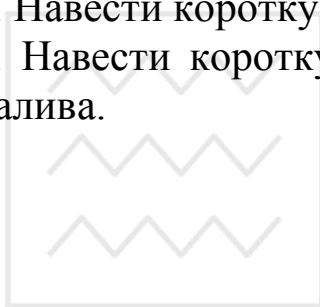
Крім широко розповсюдженого рідко фазного крекінгу в проми-



словості знаходять розповсюдження і інші процеси термічної переробки рідкого палива. Одним з таких процесів є паро фазний крекінг-піроліз в результаті якого має місце вихід великої кількості вуглеводневих газів з теплотою згоряння $45000 - 47000 \text{ кДж} / \text{м}_n^3$.

Запитання для самоконтролю.

1. Дати визначення основних фізико-технічних характеристик твердого палива.
2. Дати визначення основних фізико-технічних характеристик рідкого палива.
3. Дати визначення основних фізико-технічних характеристик газоподібного палива.
4. Навести коротку характеристику та маркування твердого палива.
5. Навести коротку характеристику та маркування рідкого палива.
6. Навести коротку характеристику та маркування газоподібного палива.





3. МАТЕРІАЛЬНІ БАЛАНСИ ПРОЦЕСУ ПОВНОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА

3.1. Коефіцієнт надлишку повітря

Для спалювання (окислювання) будь-якого палива необхідний окислювач. Як правило використовується кисень повітря, у повітрі по об'єму знаходиться 79% (об'єм) азоту і 21% кисню. Азоту в повітрі більше, ніж кисню по об'єму в

$$\frac{79}{21} = 3,7619 \approx 3,76 \text{ раз.}$$

Азоту в повітрі більше, ніж кисню по масі в

$$\frac{79 \cdot \mu_{N_2}}{21 \cdot \mu_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3,29 \text{ раз.}$$

Для більш ефективного спалювання газоподібного палива його перед спалюванням перемішують з повітрям за допомогою пристроїв (пальників) для спалювання палива, а іноді просто подають у зону горіння паливо і повітря по двом паралельним трубам. Однак, як би ми ретельно не перемішували паливо з повітрям не всі молекули палива знаходять собі кисень і його може не вистачити для повного горіння палива.

Розрізняють повне і неповне горіння палива



При неповному горінні палива в продуктах згорання з'являється окис вуглецю, який є шкідливим газом для людини.

Відношення дійсної кількості повітря V_e^d , що надходить на спалювання, до теоретично необхідної V_e^o називається *коефіцієнтом витрати (надлишку) повітря* і позначається α . Коефіцієнт витрати (надлишку) повітря- це безрозмірна величина.

$$\alpha = \frac{V_e^d}{V_e^o}, \quad (3.1)$$

де V_e^d – дійсна кількість повітря, яке надходить на спалювання одиниці маси або одиниці об'єму палива, $m_n^3 / m_{n\text{палива}}^3$ ($m_n^3 / kg_{\text{палива}}$);

V_e^o – теоретична кількість повітря, яке надходить на спалювання одиниці маси або одиниці об'єму палива, $m_n^3 / m_{n\text{палива}}^3$ ($m_n^3 / kg_{\text{палива}}$).



Якщо $\alpha = 1,0$ - це коефіцієнт витрати;

$\alpha > 1,0$ - це коефіцієнт надлишку;

$\alpha < 1,0$ - це коефіцієнт витрати, тому що окислювача не вистачає, і буде мати місце неповне горіння.

На практиці з урахуванням можливих втрат повітря при його транспортуванні в зону горіння (нещільності повітропроводів), для повного згоряння палива приймають $\alpha > 1,0$.

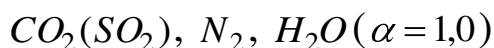
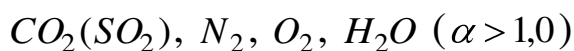
Крім того, величина α залежить від виду палива і від виду пристрою для спалювання палива.. Наприклад, для спалювання вугілля (особливо у вигляді пилу) α менше, ніж при спалюванні дров. і від виду пристрою для спалювання палива.

Нижче наведені рекомендовані значення коефіцієнту надлишку повітря α :

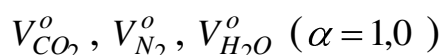
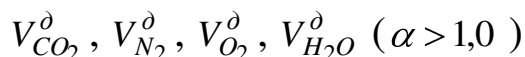
- | | |
|---|----------------------------|
| - дрова в шахтних топках | $\alpha = 1,25 \dots 1,35$ |
| - кам'яне і буре вугілля : | |
| - в топках з ручним обслуговуванням | $\alpha = 1,5 \dots 1,8$ |
| - в топках з механічною подачею | $\alpha = 1,2 \dots 1,4$ |
| - пиловидне паливо | $\alpha = 1,2 \dots 1,3$ |
| - мазут | $\alpha = 1,1 \dots 1,2$ |
| - газ в пальниках без попереднього змішування | $\alpha = 1,1 \dots 1,15$ |
| - газ в пальниках з попереднім змішуванням | $\alpha = 1,01 \dots 1,05$ |

3.2. Об'ємні долі продуктів згоряння палива

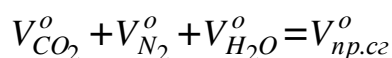
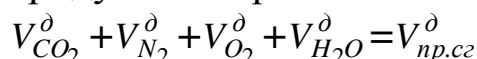
При повному спалюванні палива утворюються продукти згоряння



Введемо позначення



Сумарна кількість продуктів згоряння палива



Відношення і-го компонента продуктів згоряння палива до їх за-



гального об'єму називається *об'ємною долею* і позначається r_i

$$r_{CO_2}^{\partial} = \frac{V_{CO_2}^{\partial}}{V_{np.cг}^{\partial}}; r_{N_2}^{\partial} = \frac{V_{N_2}^{\partial}}{V_{np.cг}^{\partial}}; r_{O_2}^{\partial} = \frac{V_{O_2}^{\partial}}{V_{np.cг}^{\partial}}; r_{H_2O}^{\partial} = \frac{V_{H_2O}^{\partial}}{V_{np.cг}^{\partial}}$$

$$\sum_{i=1}^4 r_i^{\partial} = 1,0$$

або

$$r_{CO_2}^o = \frac{V_{CO_2}^o}{V_{np.cг}^o}; r_{N_2}^o = \frac{V_{N_2}^o}{V_{np.cг}^o}; r_{H_2O}^o = \frac{V_{H_2O}^o}{V_{np.cг}^o}$$

$$\sum_{i=1}^4 r_i^o = 1,0.$$

Сума об'ємних долей продуктів згоряння палива повинна бути рівною 1,0.

3.3. Парціальні тиски продуктів згоряння

Парціальним тиском і-го компонента суміші продуктів згоряння палива називають тиск, при якому цей компонент займає весь об'єм.

$$P_{CO_2}^{\partial} = P_{абс} \cdot r_{CO_2}^{\partial} = P_{абс} \cdot \frac{V_{CO_2}^{\partial}}{V_{np.cг}^{\partial}}, \quad (3.2)$$

$$P_{CO_2}^o = P_{абс} \cdot r_{CO_2}^o = P_{абс} \cdot \frac{V_{CO_2}^o}{V_{np.cг}^o}, \quad (3.3)$$

де $P_{абс}$ - абсолютний тиск у зоні горіння, величина абсолютного тиску може мати розмірність *кПа, мм.рт.ст., бар*, і т.д. В системі СІ одиницею виміру тиску є *кПа*.

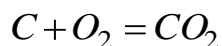
3.4. Розрахунок горіння твердого (рідкого) палива

Розрахунки горіння твердого і рідкого палива виконуються однаково.

Розрахунок проводиться в *кмолях* на 100 *кг* палива. Перед розрахунком заданий склад палива необхідно перерахувати на робочу масу.

Припустимо що паливо складається з 80 *кг* вуглецю у

100 кг палива, запишемо реакцію горіння вуглецю



де $C^P = 80$ кг у 100 кг палива.

Повітря

O_2	N_2	V_6
$\frac{80}{12} = 6,66 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$	$6,66 \cdot 3,76 = 25,06 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$	$6,66 + 25,06 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$

Продукти згоряння

$RO_2(CO_2)$	N_2	H_2O	O_2	$V_{np.zg}$
$\frac{80}{12} = 6,66 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$	$25,06 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$	–	–	$RO_2 + N_2 = 31,72 \frac{\text{кмоль}}{100\text{кг}}$

Ці розрахунки ми виконали, вважаючи повітря абсолютно сухим, хоча практично воно завжди вологе і при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0$, тобто брали теоретично необхідну кількість кисню по реакції горіння.

При подальших розрахунках нам необхідно врахувати вологовміст повітря $d_r = \frac{z \cdot H_2O}{M_n^3}$ і розрахунки виконати для заданих значень коефіцієнту надлишку повітря α . Крім того, результати розрахунку ми отримаємо в $\frac{\text{кмоль}}{100\text{кг } n - \text{ва}}$ не зовсім зручні для подальшого вико-

ристання, краще отримувати результат в. $\frac{M_n^3}{\text{кг } n - \text{ва}}$, а тому потріб-

но виконати перерахунок $V_{N_2np.zg}^o = \frac{N_2 \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_n^3 N_2}{\text{кг } n - \text{ва}} \right)$ і т.д.

Для розрахунку повного горіння палива підготуємо таблицю і заповнимо її (див. табл. 3.1). Таблицю зручніше розташовувати вздовж сторінки.

Обробка результатів розрахунку твердого (рідкого) палива:

- теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння палива



$$V_6^o = \frac{(B + \varepsilon') \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

- теоретична кількість продуктів повного згоряння палива ($\alpha = 1,0$)

$$V_{RO_2 \text{ пр.зг}}^o = \frac{\Gamma \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2 RO_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

$$V_{O_2 \text{ пр.зг}}^o = 0;$$

$$V_{N_2 \text{ пр.зг}}^o = \frac{Д \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2 N_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

$$V_{H_2O \text{ пр.зг}}^o = \frac{(E + \varepsilon') \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2 O}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

$$V_{\text{пр.зг}}^o = \frac{(Ж + \varepsilon') \cdot 22,4}{100} = V_{RO_2 \text{ пр.зг}}^o + V_{N_2 \text{ пр.зг}}^o + V_{H_2O \text{ пр.зг}}^o \left(\frac{M_{H_2 \text{ пр.зг}}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right).$$

- дійсна кількість повітря, необхідного для спалювання палива

$$V_6^{\partial} = \alpha \cdot V_6^o = \frac{(\alpha \cdot B + \varepsilon'') \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right)$$

- дійсна кількість продуктів повного згоряння палива ($\alpha > 1,0$)

$$V_{RO_2 \text{ пр.зг}}^{\partial} = \frac{\Gamma \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2 RO_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

$$V_{O_2 \text{ пр.зг}}^{\partial} = \frac{(\alpha \cdot A - A) \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2 O_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$

$$V_{N_2 \text{ пр.зг}}^{\partial} = \frac{(\alpha \cdot B - B) + Д}{100} \cdot 22,4 \left(\frac{M_{H_2 N_2}^3}{\text{кг } n - \text{ва}} \right);$$



$$V_{H_2O \text{ np.}cz}^{\partial} = \frac{(E + \varepsilon'') \cdot 22,4}{100} \left(\frac{M_{H_2O}^3}{\kappa z \ n - \nu a} \right);$$

$$V_{np.cz}^{\partial} = \frac{(3 + \varepsilon''') \cdot 22,4}{100} = V_{RO_2 \text{ np.}cz}^{\partial} + V_{O_2 \text{ np.}cz}^{\partial} + V_{N_2 \text{ np.}cz}^{\partial} + V_{H_2O \text{ np.}cz}^{\partial} \left(\frac{M_{np.cz}^3}{\kappa z \ n - \nu a} \right)$$

- об'ємні долі продуктів згоряння палива, $r_{i \text{ np.}cz}$

$$\alpha = 1,0$$

$$r_{N_2 \text{ np.}cz}^o = \frac{D}{\mathcal{K} + \varepsilon'};$$

$$r_{RO_2 \text{ np.}cz}^o = \frac{\Gamma}{\mathcal{K} + \varepsilon'};$$

$$r_{H_2O \text{ np.}cz}^o = \frac{E + \varepsilon'}{\mathcal{K} + \varepsilon'};$$

$$\sum_i r_{i \text{ np.}cz}^o = 1,0$$

$$\alpha > 1,0$$

$$r_{RO_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = \frac{\Gamma}{3 + \varepsilon''};$$

$$r_{O_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = \frac{\alpha \cdot A - A}{3 + \varepsilon''};$$

$$r_{N_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = \frac{\alpha \cdot B - B + D}{3 + \varepsilon''};$$

$$r_{H_2O \text{ np.}cz}^{\partial} = \frac{E + \varepsilon''}{3 + \varepsilon''}$$

$$\sum_i r_{i \text{ np.}cz}^{\partial} = 1,0$$

- парціальні тиски продуктів згоряння

$$\alpha = 1,0$$

$$P_{RO_2 \text{ np.}cz}^o = P_{abc} \cdot r_{RO_2 \text{ np.}cz}^o;$$

$$P_{N_2 \text{ np.}cz}^o = P_{abc} \cdot r_{N_2 \text{ np.}cz}^o;$$

$$P_{H_2O \text{ np.}cz}^o = P_{abc} \cdot r_{H_2O \text{ np.}cz}^o;$$

$$\sum_i P_{i \text{ np.}cz}^o = P_{abc}$$

$$\alpha > 1,0$$

$$P_{RO_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = P_{abc} \cdot r_{RO_2 \text{ np.}cz}^{\partial};$$

$$P_{O_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = P_{abc} \cdot r_{O_2 \text{ np.}cz}^{\partial};$$

$$P_{N_2 \text{ np.}cz}^{\partial} = P_{abc} \cdot r_{N_2 \text{ np.}cz}^{\partial};$$

$$P_{H_2O \text{ np.}cz}^{\partial} = P_{abc} \cdot r_{H_2O \text{ np.}cz}^{\partial};$$

$$\sum_i P_{i \text{ np.}cz}^{\partial} = P_{abc}$$

Таблиця 3.1

Розрахунок повного горіння твердого (рідкого) палива

Назва	кг у 100 кг	Реакція горіння	Повітря			Продукти згорання				
			O_2	N_2	V_{ex}	RO_2	O_2	N_2	H_2O	$V_{пр.гг.}$
C^P	C^P	$C + O_2 = CO_2$	$\frac{C^P}{12}$	$\frac{C^P}{12} \cdot 3,76$	$\frac{C^P}{12} \cdot 4,76$	$\frac{C^P}{12}$	-	$\frac{C^P}{12} \cdot 3,76$	-	$\frac{C^P}{12} \cdot 4,76$
H^P	H^P	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	$\frac{H^P}{2 \cdot 2}$	$\frac{H^P}{4} \cdot 3,76$	$\frac{H^P}{4} \cdot 4,76$	-	-	$\frac{H^P}{4} \cdot 3,76$	$\frac{H^P}{2}$	$\frac{H^P}{4} \cdot 3,76 + \frac{H^P}{2}$
O^P	O^P	-	$-\frac{O^P}{32}$	$-\frac{O^P}{32} \cdot 3,76$	$-\frac{O^P}{32} \cdot 4,76$	-	-	$-\frac{O^P}{32} \cdot 3,76$	-	$-\frac{O^P}{32} \cdot 3,76$
N^P	N^P	-	-	-	-	-	-	$\frac{N^P}{28}$	-	$\frac{N^P}{28}$
S^P	S^P	$S + O_2 = SO_2$	$\frac{S^P}{32}$	$\frac{S^P}{32} \cdot 3,76$	$\frac{S^P}{32} \cdot 4,76$	$\frac{S^P}{32}$	-	$\frac{S^P}{32} \cdot 3,76$	-	$\frac{S^P}{32} \cdot 4,76$
A^P	A^P	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W^P	W^P	-	-	-	-	-	-	-	$\frac{W^P}{18}$	$\frac{W^P}{18}$
100кг		$\alpha = 1,0$; повітря сухе	А	Б	У	Г	-	Д	Е	Ж
$\varepsilon' = \frac{B \cdot d_{\varepsilon}}{804} = \frac{\text{кмоль}(H_2O)}{100\text{кг } n - \text{ва}}$ $\varepsilon'' = \frac{\alpha \cdot B \cdot d_{\varepsilon}}{804} = \frac{\text{кмоль}(H_2O)}{100\text{кг } n - \text{ва}}$		$\alpha = 1,0$; повітря вологе	А	Б	У+ε'	Г	-	Д	Е+ε'	Ж+ε'
		$\alpha > 1,0$; повітря сухе	αА	αБ	αУ	Г	αА-А	(αБ-Б)+Д	Е	З
		$\alpha > 1,0$; повітря вологе	αА	αБ	αУ+ε''	Г	αА-А	(αБ-Б)+Д	Е+ε''	З+ε''



3.5. Розрахунок горіння газоподібного палива

Розрахунок горіння газоподібного палива виконують аналогічно, тільки розрахунки проводять не в *кмолях*, а в m_n^3 . Якщо паливо містить більш одного компонента зручніше розрахунок виконати для $100 m_n^3$ палива. Перед розрахунком необхідно виконати перерахунок сухого газоподібного палива на вологий газ.

Таблиця для розрахунку така, як і для розрахунку повного горіння твердого палива. Для розрахунку прийmemo паливо, що складається з декількох вуглеводнів, хоча паливо може складатися і з їхнього цілого ряду.

Розрахунок повного горіння газоподібного палива (див. табл. 3.2).

Обробка результатів розрахунку газоподібного палива.

- теоретично необхідна кількість повітря для повного згорання палива

$$V_{\epsilon}^o = \frac{B + \epsilon}{100} \left(\frac{M_n^3 \epsilon}{M_n^3 n - \epsilon a} \right);$$

- теоретична кількість продуктів повного згорання палива ($\alpha = 1,0$)

$$V_{RO_2 \text{ пр.зг}}^o = \frac{\Gamma}{100} \left(\frac{M_n^3 RO_2}{M_n^3 n - \epsilon a} \right);$$

$$V_{O_2 \text{ пр.зг}}^o = 0;$$

$$V_{N_2 \text{ пр.зг}}^o = \frac{D}{100} \left(\frac{M_n^3 N_2}{M_n^3 n - \epsilon a} \right);$$

$$V_{H_2O \text{ пр.зг}}^o = \frac{E + \epsilon}{100} \left(\frac{M_n^3 H_2O}{M_n^3 n - \epsilon a} \right);$$

$$V_{\text{пр.зг}}^o = \frac{(Ж + \epsilon')}{100} = V_{RO_2 \text{ пр.зг}}^o + V_{N_2 \text{ пр.зг}}^o + V_{H_2O \text{ пр.зг}}^o \left(\frac{M_n^3 \text{ пр.зг}}{M_n^3 n - \epsilon a} \right).$$



- дійсна кількість повітря, необхідного для спалювання палива

$$V_6^\partial = \frac{\alpha \cdot B + \varepsilon''}{100} \left(\frac{M_{н\ v}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right).$$

- дійсна кількість продуктів повного згоряння палива ($\alpha > 1,0$)

$$V_{RO_2\ np.зг}^\partial = \frac{\Gamma}{100} \left(\frac{M_{н\ RO_2}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right);$$

$$V_{O_2\ np.зг}^\partial = \frac{\alpha \cdot A - A}{100} \left(\frac{M_{н\ O_2}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right);$$



$$V_{N_2\ np.зг}^\partial = \frac{\alpha \cdot B - B + D}{100} \left(\frac{M_{н\ N_2}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right);$$

$$V_{H_2O\ np.зг}^\partial = \frac{E + \varepsilon''}{100} \left(\frac{M_{н\ H_2O}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right);$$

$$V_{np.зг}^\partial = \frac{3 + \varepsilon''}{100} = V_{RO_2\ np.зг}^\partial + V_{O_2\ np.зг}^\partial + V_{N_2\ np.зг}^\partial + V_{H_2O\ np.зг}^\partial \left(\frac{M_{н\ np.зг}^3}{M_{н\ n-ва}^3} \right).$$

Об'ємні долі і парціальні тиски продуктів згоряння розраховуються аналогічно, як і для твердого (рідкого) палива.

Таблиця 3.2

Розрахунок повного горіння газоподібного палива

Назва	$\frac{M_n^3}{100 M_n^3}$ у	Реакція горіння	Повітря			Продукти згорання				
			O_2	N_2	V_{ex}	RO_2	O_2	N_2	H_2O	$V_{np.cz}$
CH_4	CH_4	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	$2CH_4$	$2CH_4 \cdot 3,76$	$2CH_4 \cdot 4,76$	CH_4	-	$2CH_4 \cdot 3,76$	$2CH_4$	Σ
C_2H_6	C_2H_6	$C_2H_6 + 3,5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	$3,5C_2H_6$	$3,5C_2H_6 \cdot 3,76$	$3,5C_2H_6 \cdot 4,76$	$2C_2H_6$	-	$3,5C_2H_6 \cdot 3,76$	$3C_2H_6$	Σ
C_3H_8	C_3H_8	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	$5C_3H_8$	$5C_3H_8 \cdot 3,76$	$5C_3H_8 \cdot 4,76$	$3C_3H_8$	-	$5C_3H_8 \cdot 3,76$	$4C_3H_8$	Σ
O_2	O_2	-	$-O_2$	$-O_2 \cdot 3,76$	$-O_2 \cdot 4,76$	-	-	$-O_2 \cdot 3,76$	-	$-O_2 \cdot 3,76$
CO	CO	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	$0,5CO$	$0,5CO \cdot 3,76$	$0,5CO \cdot 4,76$	CO	-	$0,5CO \cdot 3,76$	-	Σ
N_2	N_2	-	-	-	-	-	-	N_2	-	N_2
H_2O	H_2O	-	-	-	-	-	-	-	H_2O	H_2O
CO_2	CO_2	-	-	-	-	CO_2	-	-	-	CO_2
$100M_n^3$		$\alpha = 1,0$; повітря сухе	A	B	У	Г	-	Д	Е	Ж
$\varepsilon' = \frac{B \cdot d_g}{804} = \frac{M_n^3}{100M_n^3}$ $\varepsilon'' = \frac{\alpha \cdot B \cdot d_g}{804} = \frac{M_n^3}{100M_n^3}$		$\alpha = 1,0$; повітря вологе	A	B	У+ε'	Г	-	Д	Е+ε'	Ж+ε'
		$\alpha > 1,0$; повітря сухе	αA	αB	αУ	Г	αA-A	(αB-B)+Д	Е	З
		$\alpha > 1,0$; повітря вологе	αA	αB	αУ+ε''	Г	αA-A	(αB-B)+Д	Е+ε''	З+ε''



3.6. Склад продуктів згоряння палива і кількість теплоти, яка виділяється, з врахуванням конденсації водяної пари

Конденсація водяної пари, яка знаходиться в продуктах згоряння палива, починається при охолодженні їх до температури початку конденсації (температури точки роси). Точка роси залежить від парціального тиску водяної пари в продуктах згоряння палива.

Визначається точка роси за таблицями для насичені водяної пари в залежності від парціального тиску водяної пари $P_{H_2O}^{\partial}$.

Після початку процесу конденсації водяної пари з продуктів згоряння палива, кількість водяної пари в продуктах згоряння зменшується і відповідно знижується їх об'ємна доля і парціальний тиск, що призводить до зупинки процесу конденсації.

Приклад 5.

$$\begin{array}{l} N_2 = 5 \\ O_2 = 10 \\ H_2O = 10 \\ \sum_1^3 25 \\ r_{H_2O} = 0,4 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} N_2 = 5 \\ O_2 = 10 \\ \vdots \\ H_2O = 6 \\ \sum_1^3 16 \\ r_{H_2O} = 0,285 \end{array}$$

Отже, для того, щоб конденсація продовжувалась, необхідно далі знижувати температуру продуктів згоряння і в тому числі водяної пари. Теоретично вся водяна пара сконденсується при зниженні температури продуктів згоряння (водяної пари) до 0°C .

Поставимо задачу: визначити склад продуктів згоряння після зниження їх температури на величину $\Delta t_{np.zg}$ нижче температури точки роси.

1. Вихідні дані

- склад продуктів згоряння та їх об'ємні долі

$$V_{RO_2}^{\partial}, V_{N_2}^{\partial}, V_{O_2}^{\partial}, V_{H_2O}^{\partial}, V_{np.zg}^{\partial}, r_{RO_2}^{\partial}, r_{N_2}^{\partial}, r_{O_2}^{\partial}, r_{H_2O}^{\partial};$$

- абсолютний тиск в зоні горіння $P_{абс}$

- парціальний тиск водяної пари $P_{H_2O}^{\partial} = P_{абс} \cdot r_{H_2O}^{\partial}$

2. Розв'язання

- за таблицями для насиченої водяної пари по $P_{H_2O}^{\partial}$ визначаємо температуру точки роси – температуру початку процесу конденсації, $t_{нас}^{\Pi}$;



- температура продуктів згоряння в кінці процесу конденсації,
 $t_{нас}^K = t_{нас}^П - \Delta t_{пр.зг}$, це буде температура точки роси в кінці процесу конденсації;

- за $t_{нас}^K$ по тих же таблицях (тільки по температурі) визначаємо парціальний тиск водяної пари в кінці процесу конденсації; $P_{H_2O}^K$;

- об'ємна доля водяної пари в кінці процесу конденсації визначається з формули: $t_{нас}^K = t_{нас}^П - \Delta t_{пр.зг}$, звідси об'ємна доля водяної пари:

$$r_{H_2O}^K = \frac{P_{H_2O}^K}{P_{абс}}$$

- склад продуктів згоряння палива в кінці процесу конденсації:
запишемо рівняння для визначення об'ємної долі водяної пари

$$r_{H_2O}^K = \frac{V_{H_2O}^{\delta} - X}{V_{пр.зг}^{\delta} - X},$$

де X – кількість водяної пари, на яку зменшився склад продуктів згоряння палива в результаті конденсації водяної пари;

з останнього рівняння визначаємо питому кількість водяної пари, яка сконденсувалась.

$$V_{H_2O}^K = V_{H_2O}^{\delta} - X,$$

величини $V_{RO_2}^K$, $V_{N_2}^K$, $V_{O_2}^K$ залишаються без змін, як і до конденсації H_2O .

- об'ємні долі продуктів згоряння в кінці процесу конденсації

$$r_{RO_2}^K = \frac{V_{RO_2}^K}{V_{пр.зг}^K} = \frac{V_{RO_2}^{\delta}}{V_{пр.зг}^{\delta} - X},$$

- аналогічно визначаємо об'ємні долі азоту та кисню $r_{N_2}^K$ і $r_{O_2}^K$;

- перевіряємо об'ємні долі продуктів згоряння після конденсації H_2O ,

$$\sum_{i=1}^n r_i^K = 1,0;$$

- питома кількість теплоти, яка виділяється в результаті процесу конденсації H_2O

$$Q_{конд} = X \cdot r_{H_2O}^{конд} \cdot \rho_{H_2O}^{н.у} \cdot \frac{кДж}{м^3_{H_2O-ва}}$$

де $r_{H_2O}^{конд} = 2516 \frac{кДж}{кг_{H_2O}}$ - питома теплота конденсації водяної пари.



далі можна визначити t_K з врахуванням конденсації водяної пари при охолодженні продуктів згоряння на Δt_T

Запитання для самоконтролю.

1. Що означає коефіцієнт надлишку повітря?
2. Чому дійсний об'єм повітря при роботі вогнетехнічних установок більше теоретичного?
3. Записати реакції окислення горючих компонентів твердого палива.
4. Записати реакції окислення горючих компонентів газоподібного палива.
5. Визначити теоретично необхідний об'єм повітря для повного спалювання 10 кг горючої сірки. Вологовміст повітря прийняти рівним $d_B = 12 \text{ г} / \text{м}_H^3$.
6. Визначити теоретично необхідний об'єм повітря для повного спалювання 10 м_H^3 метану. Вологовміст повітря прийняти рівним $d_B = 12 \text{ г} / \text{м}_H^3$, вологовміст палива прийняти рівним $d_H = 10 \text{ г} / \text{м}_H^3$.
7. Як визначити об'ємні долі та парціальні тиски продуктів згоряння палива?
8. Теоретичний склад продуктів повного згоряння палива.
9. Дійсний склад продуктів повного згоряння палива.
10. Записати склад продуктів згоряння палива з врахуванням конденсації водяної пари.
11. Чому рівна кількість теплоти, яка виділяється при конденсації водяної пари?



4. ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ПАЛИВА ТА ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДІГРІВУ КОМПОНЕНТІВ ГОРІННЯ

Важливою величиною є температура горіння палива, яка залежить від виду палива, від його вологості, коефіцієнта надлишку повітря, від температури окислювача і від температури палива.

Коефіцієнт надлишку повітря в свою чергу залежить від виду палива і від виду пристрою для спалювання палива.

Розрізняють такі температури горіння палива: *калориметричну, жаропродуктивну, теоретичну, розрахункову.*

4.1. Калориметрична температура горіння палива

Це температура, до якої нагрілись би продукти згорання палива, якщо б вся теплота, виділена в топці з зони горіння, пішла б на нагрів цих продуктів згорання.

Калориметрична температура t_K залежить від коефіцієнта надлишку повітря, складу палива, температури палива t_{II} і повітря t_B . Калориметрична температура не враховує ніякі теплові втрати з зони горіння.

Для визначення калориметричної температури горіння палива складаємо рівняння теплового балансу

$$Q_H^P + I_{\phi}^B + I_{\phi}^{II} = V_{np.зг.}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.зг.} \cdot t_K, \quad (4.1)$$

Звідси

$$t_K = \frac{Q_H^P + I_{\phi}^B + I_{\phi}^{II}}{V_{np.зг.}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.зг.}}, \quad (4.2)$$

Розглянемо складові залежності 4.2

I_{ϕ}^B - ентальпія повітря, яке поступає на горіння

$$I_{\phi}^B = \alpha \cdot V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B, \quad (4.3)$$

де \bar{C}_B - середня по складу повітря, в інтервалі температур від $0^{\circ}C$ до t_B , ізобарна, об'ємна теплоємність повітря, $\frac{kJ}{m^3 \cdot K}$;

t_B - температура попереднього підігріву повітря, $^{\circ}C$.

I_{ϕ}^{II} - ентальпія палива, що поступає на горіння.



$\bar{C}_{np.32}$ - середня по складу продуктів згорання, в інтервалі температур від $0^{\circ}C$ до t_K , ізобарна, об'ємна теплоємність продуктів згорання;

Q_H^P , V_B^O , α , $V_{np.32}^O$ - раніше відомі величини.

$$I_{\phi}^T = 1 \cdot \bar{C}_{\Pi} \cdot t_{\Pi}, \quad (4.4)$$

де 1 – кількість палива, що розглядається в рівнянні теплового балансу, m_H^3 або $кг$

\bar{C}_{Π} - середня по складу газоподібного палива, в інтервалі температур від $0^{\circ}C$ до t_{Π} , ізобарна, об'ємна теплоємність газоподібного палива або теплоємність твердого (рідкого) палива, при температурі t_{Π} , $\frac{кДж}{м_H^3 \cdot K}$ $\left(\frac{кДж}{кг \cdot K} \right)$.

Визначити калориметричної температури горіння палива з формули 4.2 шляхом прямого розрахунку неможливо, так як воно має два невідомі: t_K і $\bar{C}_{np.32}$ (залежить від t_K). Тому розрахунки проводяться шляхом поступового наближення.

1. Задаємося t'_k ;
2. Ліву частину рівняння 4.1 позначимо I_K і обчислимо значення

$$I_K = Q_H^P + I_{\phi}^T + I_{\phi}^B = Q_H^P + \bar{C}_T \cdot t_T + \alpha \cdot V_B^O \cdot \bar{C}_B \cdot t_B;$$

3. Визначаємо значення теплоємності продуктів згорання палива

$$\begin{aligned} \bar{C}_{np.32} = & \bar{C}_{RO_2np.32} \cdot r_{RO_2np.32}^O + \bar{C}_{O_2np.32} \cdot r_{O_2np.32}^O + \\ & + \bar{C}_{N_2np.32} \cdot r_{N_2np.32}^O + \bar{C}_{H_2O_{np.32}} \cdot r_{H_2O_{np.32}}^O, \end{aligned}$$

де $\bar{C}_{RO_2np.32} = \bar{C}_{RO_2} \Big|_0^{t'_k}$, $\frac{кДж}{м_H^3 \cdot K}$;

$\bar{C}_{O_2np.32} = \bar{C}_{O_2} \Big|_0^{t'_k}$, $\frac{кДж}{м_H^3 \cdot K}$; і т.д. – визначаються за таблицями для середніх теплоємностей при температурі t'_k .

4. Праву частину рівняння 4.1 позначимо $I'_{np.32}$ і визначимо її значення

$$I'_{np.32} = V_{np.32}^O \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t'_K,$$

5. Порівнюємо I_K і $I'_{np.32}$



якщо $I'_{np.32} < I_K$, то ми задались (t'_K) більш низькою температурою і її необхідно збільшити.

6. Перезадаємося $t''_K = t'_K + 100$;

7. Визначаємо значення теплоємності продуктів згоряння палива $\bar{C}_{np.32} \Big|_0^{t''_K}$.

8. Вираховуємо значення ентальпії продуктів згоряння палива

$$I''_{np.32} = V_{np.32}^0 \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t''_K,$$

9. Порівнюємо I_K і $I''_{np.32}$

якщо $I''_{np.32} > I_K$, то ми задались (t'_K) більш низькою температурою.

Доцільно зобразити малюнок

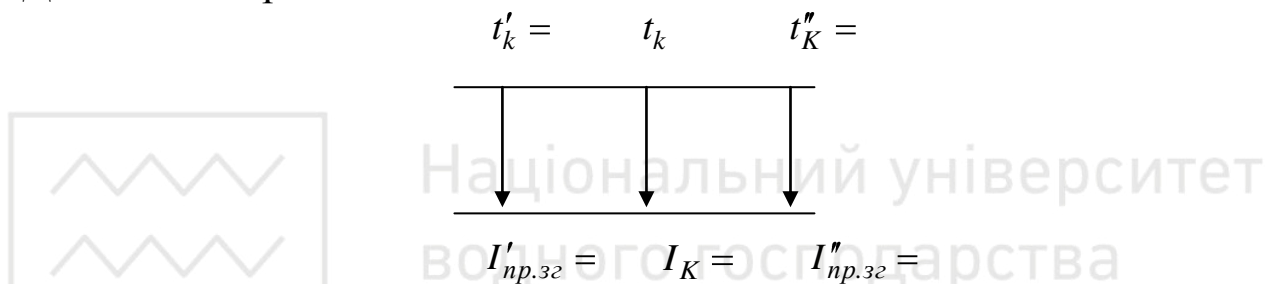


Рис. 4.1. До визначення калориметричної температури горіння палива

Як тільки ми значення I_K взяли “у вилку” в інтервалі $100^\circ C$ (таблиці теплоємностей складаємо з інтервалом $100^\circ C$) визначаємо дійсне значення калориметричної температури горіння палива шляхом лінійного інтерполювання.

$$t_K = t'_K + \frac{I_K - I'_{np.32}}{I''_{np.32} - I'_{np.32}} \cdot 100,$$

Примітка. Якщо у нас $t''_K - t'_K$ буде більше $100^\circ C$, то в останньому рівнянні потрібно множити не на $100^\circ C$, а на $t''_K - t'_K$. При цьому точність розрахунку при інтерполяції буде менше.

4.2. Жаропродуктивна температура горіння палива

Це така температура, до якої нагрілись би продукти згоряння палива, якщо б вся теплота, що внесена в зону горіння, пішла б на нагрів цих продуктів згоряння при мінімальному стехіометричному складі ($\alpha=1.0$) і при теоретичному холодному дутті ($t_B = t_{II} = 0^\circ C$)



Жаропродуктивна температура $t_{жс}$ враховує склад палива і не враховує ніяких теплових втрат.

Для визначення жаропродуктивної температури горіння палива $t_{жс}$ складемо рівняння теплового балансу

$$Q_H^P = V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t_{жс}, \quad (4.5)$$

Звідси

$$t_{жс} = \frac{Q_H^P}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}, \quad (4.6)$$

Визначається жаропродуктивна температура $t_{жс}$ аналогічно до визначення калориметричної температури горіння палива t_K .

1. Задаємося $t'_{жс}$;

2. Визначаємо $\bar{C}_{np.32} \Big|_0^{t'_{жс}}$;

3. Вираховуємо $I'_{np.32} = V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t'_{жс}$;

4. Порівнюємо: якщо $I'_{np.32} < Q_H^P$;

5. Перезадаємося $t''_{жс} = t'_{жс} + 100$;

6. Визначаємо $\bar{C}_{np.32} \Big|_0^{t''_{жс}}$;

7. Визначаємо $I''_{np.32} = V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t''_{жс}$;

8. Порівнюємо: якщо $I''_{np.32} > Q_H^P$;

9. Вираховуємо $t_{жс} = t'_{жс} + \frac{Q_H^P - I'_{np.32}}{I''_{np.32} - I'_{np.32}} \cdot 100$

Жаропродуктивна температура - це та температура, яку може розвивати паливо на теоретично холодному дутті при мінімальному стехіометричному співвідношенні. Вона має важливе фізичне поняття, так як воно дозволяє оцінити, наскільки можна використувати дане паливо для високотемпературного процесу.

Неправильно думати, що чим вище Q_H^P , тим більшу температуру можна отримати. Наприклад: $t_{жс}^{CO} = 2400$ °C при $Q_H^P = 12,77 \frac{МДж}{м^3_H}$

а $t_{жс}^{CH_4} = 2040$ °C при $Q_H^P = 35,8 \frac{МДж}{м^3_H}$

Жаропродуктивна температура тим більша, чим більша кількість теплоти припадає на $1 м^3_H$ газів які нагріваються.



4.3. Теоретична температура горіння палива

Це така температура, до якої нагрілись би продукти згоряння палива, якщо б вся теплота, внесена в зону горіння, за виключенням теплоти від хімічного недопалу і дисоціації, пішла б на нагрів цих продуктів згоряння.

Теоретична температура горіння палива враховує склад палива, коефіцієнт надлишку повітря, температури попереднього підігріву повітря t_B і палива t_{II} , а також втрати теплоти на хімічний недопал q_3^{XH} і дисоціацію $q_3^{\partial ic}$, та не враховує інші теплові втрати, а також теплоту, яка віддається матеріалу, який нагрівається.

Рівняння теплового балансу для визначення теоретичної температури горіння палива має вигляд

$$Q_H^P + I_{\phi}^B + I_{\phi}^{II} - Q_{XH} - Q_{\partial ic} = V_{np.3z}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.3z} \cdot t_T, \quad (4.7)$$

або такий вигляд

$$Q_H^P \cdot \left(\frac{I_{\phi}^B + I_{\phi}^{II}}{Q_H^P} + \frac{100 - q_3}{100} \right) = V_{np.3z}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.3z} \cdot t_T, \quad (4.8)$$

де вираз в круглих дужках називають *коефіцієнтом тепловиділення* і позначають η'

$$\eta' = \frac{I_{\phi}^B + I_{\phi}^{II}}{Q_H^P} + \frac{100 - q_3}{100}, \quad (4.9)$$

Тоді рівняння (4.7) матиме вигляд

$$Q_H^P \cdot \eta' = V_{np.3z}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.3z} \cdot t_T, \quad (4.10)$$

Звідси теоретична температура горіння палива

$$t_T = \frac{Q_H^P \cdot \eta'}{V_{np.3z}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.3z}}, \quad (4.11)$$

де q_3 - втрати теплоти на хімічний недопал і дисоціацію у відсотках від нижчої теплоти згоряння палива (Q_H^P).

$$q_3 = q_3^{XH} + q_3^{\partial ic}, \quad (4.12)$$

q_3^{XH} - втрати теплоти від хімічного недопалу палива.

Хімічний недопал палива визначається за залежністю

$$Q_{XH} = \frac{12100 \cdot V_{np.3z}^{\partial} \cdot CO}{100}, \quad (4.13)$$



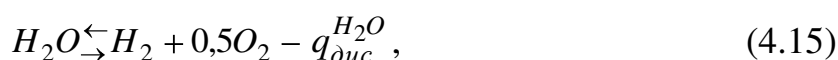
де $12100 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ – ентальпія продуктів згоряння, які складаються з $\frac{CO}{H_2} = 2,0$ по об'єму.

Питомі втрати теплоти від хімічного недопалу, % :

$$q_3^{XH} = \frac{Q_{XH}}{Q_H^P} \cdot 100, \quad (4.14)$$

Хімічний недопал не повинен враховуватись при проектуванні нових установок, проте практично він має місце.

Дисоціація палива: при температурі $\geq 1500^\circ\text{C}$ має місце дисоціація трьохатомних газів, які містяться в продуктах згоряння палива H_2O і CO_2



де $q_{дис}^{H_2O} = 286 \frac{\text{МДж}}{\text{кмоль } H_2O}$ – питома теплота дисоціації водяної пари;

$q_{дис}^{CO_2} = 243 \frac{\text{МДж}}{\text{кмоль } CO_2}$ – питома теплота дисоціації двоокису вуглецю.

Сумарні втрати теплоти від дисоціації

$$Q_{дис} = Q_{дис}^{H_2O} + Q_{дис}^{CO_2}, \quad (4.17)$$

де $Q_{дис}^{H_2O}$ – втрати теплоти від дисоціації водяної пари, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3_{н-ва}}$

$$Q_{дис}^{H_2O} = \frac{V_{H_2O \text{ пр.зг}}^\partial \cdot C_{H_2O}^{дис} \cdot q_{дис}^{H_2O} \cdot 10^3}{100 \cdot 22,4}, \quad (4.18)$$

$C_{H_2O}^{дис}$ - степінь дисоціації водяної пари, яка залежить від парціального тиску водяної пари ($P_{H_2O \text{ пр.зг}}$) і від температури продуктів згоряння.

Аналогічно втрати теплоти від дисоціації двоокису вуглецю,

$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3_{н-ва}}$

$$Q_{дис}^{CO_2} = \frac{V_{CO_2 \text{ пр.зг}}^\partial \cdot C_{CO_2}^{дис} \cdot q_{дис}^{CO_2} \cdot 10^3}{100 \cdot 22,4}, \quad (4.19)$$



$C_{CO_2}^{disc}$ - степінь дисоціації двоокису вуглецю, яка залежить від парціального тиску двоокису вуглецю ($P_{CO_2 \text{ пр.зг}}$) і від температури продуктів згоряння.

Питомі втрати теплоти від дисоціації, %

$$q_3^{disc} = \frac{Q_{disc}}{Q_H^P} \cdot 100, \quad (4.20)$$

При дисоціації H_2O і CO_2 утворюються водень (H_2) і окис вуглецю (CO), які не згорають і не виділяють теплоти в зоні горіння тому, що вони догорають за межами зони горіння (в газоході) і підвищують температуру продуктів згорання. Це необхідно враховувати при установці в газоходах теплообмінників.

4.4. Розрахункова температура горіння палива

Це така усереднена температура в установці (печі), розрахована по якій кількість теплоти рівна фактичній кількості теплоти, що передана матеріалу, який нагрівається.

$$t_{розр} = t_K \cdot \mu, \quad (4.21)$$

де μ - пірометричний коефіцієнт, який показує степінь ідеальності установки.

$$\mu = \frac{t_{розр}}{t_K}, \quad (4.22)$$

Фізичний зміст пірометричного коефіцієнту витікає з формули:

$$\mu = \frac{\eta_{топки} \cdot \eta_{роб.пр}}{1 - \frac{Q_{mat}}{B \cdot Q_H^P}}, \quad (4.23)$$

де $\eta_{топки}$ - коефіцієнт корисної дії топки;

$\eta_{роб.пр}$ - коефіцієнт корисної дії робочого простору;

Q_{mat} - кількість теплоти, яку отримав матеріал в процесі нагріву;

B - витрата палива в установці, m_H^3/c (kg/c).

Отже пірометричний коефіцієнт - це доля корисно використаної теплоти в установці за рахунок її ідеальності. Чим більше теплоти передається матеріалу що нагрівається в установці, тим більш вона ідеальна.



Для відома, значення пірометричного коефіцієнту, для різних печей знаходяться в межах $\mu = 0,5 - 0,82$:

- мартенівські печі $\mu = 0,67 \dots 0,72$
 $\mu_{сер} = 0,695$
- обертові печі для обпалу цементного клінкера $\mu = 0,65 \dots 0,75$
 $\mu_{сер} = 0,7$
- методичні печі $\mu = 0,7 \dots 0,75$
 $\mu_{сер} = 0,725$
- тунельні печі $\mu = 0,75 \dots 0,82$
 $\mu_{сер} = 0,785$
- скловарні печі $\mu = 0,58 \dots 0,62$
 $\mu_{сер} = 0,6$

4.5. Температура горіння палива з врахуванням дисоціації CO_2 і H_2O , що знаходяться в продуктах згоряння палива

В продуктах згоряння палива при високій температурі можуть дисоціювати трьохатомні гази H_2O і CO_2 . Активна їх дисоціація починається при температурі $t_{розр} \geq 1500^\circ\text{C}$. Чим вища температура, тим більше значення степені дисоціації у % від загальної їх кількості. На процес дисоціації затрачається теплота, тому калориметрична температура горіння палива з врахуванням дисоціації t_K^{disc} буде менше, ніж без врахування дисоціації t_K ($t_K^{disc} < t_K$).

Порядок визначення температури горіння палива з врахуванням дисоціації H_2O і CO_2 .

1. Вихідні дані для розрахунку:

- склад палива, вологовміст палива d_{II} (для газу), вологовміст повітря d_B , коефіцієнт надлишку повітря α ;
- температура попереднього підігріву повітря і палива t_B, t_{II} ;
- абсолютний тиск в зоні горіння (в топці) $P_{абс}$;
- пірометричний коефіцієнт в установці μ ;
- питома теплота дисоціації: водяної пари

$$q_{дис}^{H_2O} = 286 \frac{\text{МДж}}{\text{кмоль}}$$



двоокису вуглецю

$$q_{дис}^{CO_2} = 243 \frac{МДж}{кмоль}$$

2. Проводимо розрахунки повного горіння палива і визначаємо

$$V_{H_2O}^{\partial} \text{ пр.зг}, V_{CO_2}^{\partial} \text{ пр.зг}, V_{пр.зг}^{\partial}, r_{H_2O}^{\partial}, r_{N_2}^{\partial}, r_{O_2}^{\partial}, r_{CO_2}^{\partial};$$

3. Визначаємо парціальні тиски водяної пари і двоокису вуглецю $P_{H_2O}^{\partial}$ і $P_{CO_2}^{\partial}$

$$P_{H_2O}^{\partial} \text{ пр.зг} = P_{абс} \cdot r_{H_2O}^{\partial},$$

$$P_{CO_2}^{\partial} \text{ пр.зг} = P_{абс} \cdot r_{CO_2}^{\partial};$$

4. Калориметрична температура горіння палива до дисоціації H_2O і CO_2

$$t_K = \frac{Q_H^P + I_{\phi}^B + I_{\phi}^{\Pi}}{V_{пр.зг}^{\partial} \cdot \bar{C}_{пр.зг}},$$

- для твердого (рідкого) палива

$$Q_H^P = 340C^P + 1030H^P - 109 \left(\phi^P - S^P \right) \cdot 25,16W^P, \frac{кДж}{кг_{н-ва}}$$

- для газоподібного палива

$$Q_H^P = \sum_{i=1}^n Q_{екз\ i} \cdot r_i = 0,01 \sum_{i=1}^n Q_{екз\ i} \cdot V_{i\ пр.зг}, \frac{кДж}{м^3_{нн-ва}}$$

- розрахункова температура горіння палива до дисоціації

$$t_{розр} = t_K \cdot \mu,$$

5. Степінь дисоціації водяної пари і двоокису вуглецю $C_{H_2O}^{дис}$ і $C_{CO_2}^{дис}$.

Степінь дисоціації визначається за таблицями в залежності від $t_{розр}$ і $P_{H_2O}^{\partial}$ або $P_{CO_2}^{\partial}$. Це кількість газів H_2O і CO_2 після дисоціації у % по відношенню до кількості H_2O і CO_2 до дисоціації відповідно. Таблиці мають наступний вигляд: наприклад для CO_2 (табл. 4.1).

Припустимо, у нас $t_{розр} = 2268,7 \text{ } ^\circ C$ і $P_{CO_2}^{\partial} \text{ пр.зг} = 6,79 \text{ кПа}$.

Спочатку інтерполюємо по температурам та визначаємо невідомі X_1 і X_2



$$X_1 = 31,5 + \frac{40,7 - 31,5}{100} \cdot 68,7 = 37,82\%$$

$$X_2 = 30,3 + \frac{39,2 - 30,3}{100} \cdot 68,7 = 36,414\%$$

Таблиця 4.1

Степінь дисоціації CO_2 , %

$t_{\text{розр}},$ °C	Парціальні тиски, $P_{\text{CO}_2 \text{ пр.зг}}^{\partial}$, кПа		
	5,88	6,79	6,86
2200	31,5		30,3
2268,7	X_1	X_3	X_2
2300	40,7		39,2

Потім інтерполюємо по парціальному тиску та визначаємо

$$X_3 = 37,82 - \frac{37,82 - 36,41}{6,86 - 5,88} \cdot (6,79 - 5,88) = 36,5\%$$

Відповідно, степінь дисоціації $C_{\text{CO}_2}^{\text{дис}} = 36,5\%$.

Аналогічно визначаємо степінь дисоціації $C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дис}}$, %.

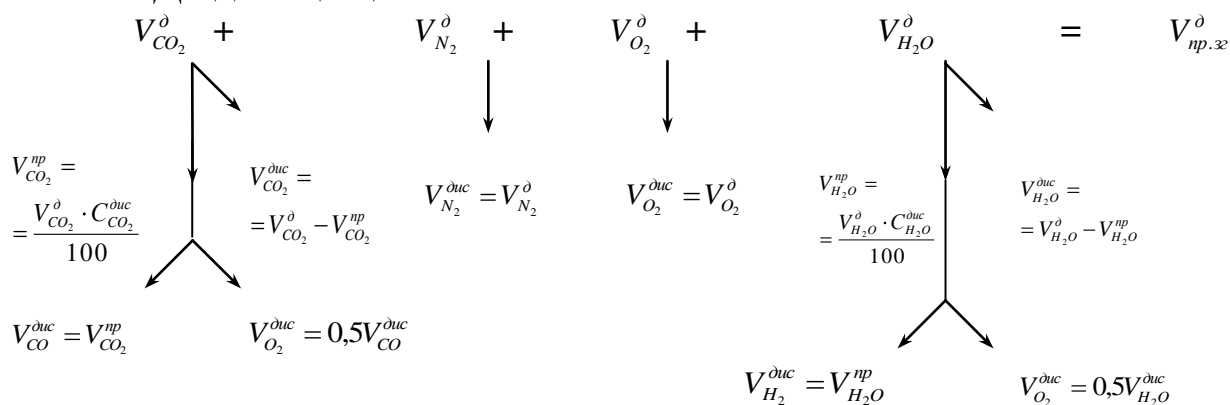
6. Склад продуктів згоряння палива після дисоціації.

Запишемо рівняння для дисоціації H_2O і CO_2



Висновок: при дисоціації $1\text{м}_\text{H}^3 \text{H}_2\text{O}$ і $1\text{м}_\text{H}^3 \text{CO}_2$ утворюється $1\text{м}_\text{H}^3 \text{H}_2$ і CO , а також $0,5\text{м}_\text{H}^3 \text{O}_2$, тобто O_2 по об'єму в два рази менше, ніж H_2O або CO_2 .

До дисоціації





7. Склад продуктів згоряння палива після дисоціації H_2O і CO_2 ,

$$\frac{M_H^3}{M_{H_{n-ва}}^3}$$

$$V_{np.32}^{disc} = V_{CO}^{disc} + V_{O_2}^{disc} + V_{CO_2}^{disc} + V_{N_2}^{disc} + V_{O_2}^{disc} + V_{H_2}^{disc} + V_{O_2}^{disc} + V_{H_2O}^{disc},$$

або

$$V_{np.32}^{disc} = V_{CO}^{disc} + V_{O_2}^{disc} + V_{CO_2}^{disc} + V_{N_2}^{disc} + V_{H_2}^{disc} + V_{H_2O}^{disc}, \quad (4.24)$$

де V_{CO}^{disc} і $V_{H_2}^{disc}$ – об'єм окису вуглецю та водню в продуктах згоряння палива, вони догоряють в газоході за межами робочого простору, це необхідно враховувати, якщо $t_{розр} > 1500^\circ C$.

8. Об'ємні долі продуктів згоряння палива після дисоціації H_2O і CO_2

$$r_{CO}^{disc} = \frac{V_{CO}^{disc}}{V_{np.32}^{disc}}, \quad (4.25)$$

Аналогічним чином визначаємо: $r_{O_2}^{disc}$, $r_{CO_2}^{disc}$, $r_{N_2}^{disc}$, $r_{H_2}^{disc}$, $r_{H_2O}^{disc}$;

9. Перевіряємо суму об'ємних долей продуктів згоряння палива.

$$\sum_{i=1}^n r_i^{disc} = r_{CO}^{disc} + r_{O_2}^{disc} + r_{N_2}^{disc} + r_{H_2}^{disc} + r_{H_2O}^{disc} + r_{CO_2}^{disc} = 1,0$$

При необхідності округляємо і вносимо уточнення.

10. Затрати теплоти на дисоціацію H_2O і CO_2 , $\frac{kJ}{M_{H_{n-ва}}^3}$.

$$Q_{CO_2}^{disc} = \frac{V_{CO_2}^{np} \cdot 10^3 \cdot q_{CO_2}^{disc}}{22,4} = \frac{V_{CO_2}^{np} \cdot 10^3 \cdot 243}{22,4}, \quad (4.26)$$

$$Q_{H_2O}^{disc} = \frac{V_{H_2O}^{np} \cdot 10^3 \cdot q_{H_2O}^{disc}}{22,4} = \frac{V_{H_2O}^{np} \cdot 10^3 \cdot 286}{22,4}, \quad (4.27)$$

Сумарні втрати теплоти на дисоціацію трьохатомних газів рівні

$$Q_{disc} = Q_{CO_2}^{disc} + Q_{H_2O}^{disc}, \quad (4.28)$$

11. Ентальпія продуктів згоряння палива після дисоціації, $\frac{kJ}{M_{H_{n-ва}}^3}$

$$I_{disc} = I_K - Q_{disc}, \quad (4.29)$$

12. Калориметрична температура горіння палива після дисоціації

$$t_K^{disc} = \frac{I_{disc}}{V_{np.32}^{disc} \cdot \bar{C}_{np.32}^{disc}}, \quad (4.30)$$



де $\bar{C}_{np.32}^{\partial ic}$ – середня по складу продуктів згорання, в інтервалі температур від $0^\circ C$ до $t_K^{\partial ic}$, ізобарна, об'ємна теплоємність продуктів

$$\bar{C}_{np.32}^{\partial ic} = \sum_{i=1}^6 \bar{C}_i^{\partial ic} \cdot r_i^{\partial ic}.$$

Висновок: $t_K^{\partial ic} < t_K$, так як $I_{\partial ic} < I_K$.

13 Розрахункова температура горіння палива з врахуванням дисоціації H_2O і CO_2

$$t_{розр}^{\partial ic} = t_K^{\partial ic} \cdot \mu, \quad (4.31)$$

4.6. Необхідність попереднього підігріву компонентів горіння палива

Визначення необхідності попереднього підігріву компонентів горіння (палива і повітря) проводиться виходячи з можливості досягнення температури в робочому об'ємі установки, яка необхідна для здійснення заданого температурного значення поверхні матеріалу, який нагрівається. При нагріві матеріалу температура продуктів згорання палива повинна бути вища температури його поверхні. Для нагрівальних і ковальських печей на $130...150^\circ C$, для термічних на $50...70^\circ C$. Перевищення температури продуктів згорання над температурою поверхні матеріалу, що нагрівається називається *температурним напором* зі сторони продуктів згорання і позначається Δt_Γ .

Порядок визначення необхідності попереднього підігріву компонентів горіння:

1. Визначаємо розрахункову температуру горіння палива

$$t_{розр} = t_M^{no6} + \Delta t_\Gamma,$$

2. Калориметрична температура горіння палива

$$t_K = \frac{t_{розр}}{\mu},$$

3. Запишемо рівняння теплового балансу для калориметричної температури горіння палива і проведемо аналіз

$$Q_H^P + I_\phi^B + I_\phi^T = V_{np.32}^\partial \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t_K,$$

Звідси

$$I_\phi^B + I_\phi^T = V_{np.32}^\partial \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t_K - Q_H^P = I_{np.32} - Q_H^P = A,$$



Якщо $\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} - Q_H^P \right) \leq 0$ - попередній підігрів компонентів горіння не потрібен.

Якщо $\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} - Q_H^P \right) > 0$ - необхідний попередній підігрів.

З останнього рівняння маємо

$$\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} + I_{\phi}^T \right) > 0,$$

4. При необхідності попереднього підігріву визначимо, які температури повинні мати паливо і повітря перед спалюванням.

Послідовність визначення температур попереднього підігріву палива і повітря:

4.1 Задаємося t_{II}

–для твердого і газоподібного $t_{II} = 20^{\circ}C$;

–для рідкого (крім мазуту і масел) $t_{II} = 20^{\circ}C$;

–для мазуту і олив $t_{II} = 100...120^{\circ}C$.

4.2 Визначаємо значення ентальпії палива

$$I_{\phi}^{II} = 1 \cdot \bar{C}_{II} \cdot t_{II},$$

4.3 Визначаємо температуру попереднього підігріву повітря з умови, що

$$I_{\phi}^B = A - I_{\phi}^{II} = B,$$

з іншої сторони значення ентальпії повітря буде рівне

$$I_{\phi}^B = \alpha \cdot V_B^O \cdot \bar{C}_B \cdot t_B = B,$$

для цього

–задаємося температурою попереднього підігріву повітря t'_B ;

–визначаємо середню по складу повітря, в інтервалі температур від $0^{\circ}C$ до t'_B , ізобарна, об'ємна теплоємність повітря $\bar{C}_B \Big|_0^{t'_B}$;

–визначаємо значення ентальпії попереднього підігріву повітря,

$$\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} \right)^* = \alpha \cdot V_B^O \cdot \bar{C}_B \cdot t'_B,$$

–порівнюємо значення $\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} \right)^*$ з величиною B , якщо $\left(\overset{B}{\underset{\phi}{Q}} \right)^* < B$;

4.4 Перезадаємося новою температурою попереднього підігріву повітря

$$t''_B = t'_B + 100;$$

4.5 Визначаємо $\bar{C}_B \Big|_0^{t''_B}$;



4.6 Визначаємо $\left(\frac{B}{\phi}\right)'' = \alpha \cdot V_B^O \cdot \bar{C}_B \Big|_0^{t_B''} \cdot t_B'';$

4.7 Порівнюємо значення $\left(\frac{B}{\phi}\right)''$ з B , якщо $\left(\frac{B}{\phi}\right)'' > B$.

4.8 Визначаємо дійсне значення температури попереднього підігріву повітря

$$t_B = t_B' + \frac{B - \left(\frac{B}{\phi}\right)''}{\left(\frac{B}{\phi}\right)'' - \left(\frac{B}{\phi}\right)'} \cdot 100,$$

5. Аналізуємо температури

–якщо $t_B < 1200^\circ\text{C}$, то залишаємо прийнятні температури попереднього підігріву палива та повітря t_{II} і t_B ;

–якщо $t_B > 1200^\circ\text{C}$, то необхідно підігрівати паливо, при цьому:

а) якщо в нас мазут або олива і ми вже прийняли $t_{II} = 100...120^\circ\text{C}$, то робимо висновок, що ми не можемо досягнути заданої температури $t_{розр}$, а відповідно і $t_m^{ноє}$, отже паливо нам не підходить (потрібна його заміна)

б) якщо у нас тверде паливо і ми вже прийняли $t_{II} = 20^\circ\text{C}$ то робимо такий же висновок.

в) якщо у нас газоподібне паливо, то його можна підігрівати до $t_{II} = 1200^\circ\text{C}$.

6. Порядок визначення температури попереднього підігріву газоподібного палива

6.1 Приймаємо температури попереднього підігріву повітря $t_B = 1200^\circ\text{C}$ (тобто максимально можливу);

6.2 Визначаємо значення ентальпії повітря, що поступає на горіння

$$I_{\phi}^B = \alpha \cdot V_B^O \cdot \bar{C}_B \Big|_0^{1200} \cdot t_B = C,$$

6.3 Визначаємо значення ентальпії попереднього підігріву палива

$$I_{\phi}^{II} = A - C = D,$$

6.4 Визначаємо температуру попереднього підігріву газоподібного палива

$$C_{II} \cdot t_{II} = D,$$

6.5 Задаємось температурою попереднього підігріву газоподібного палива t_{II}'

6.6 Визначаємо теплоємність газоподібного палива $\bar{C}_{II} \Big|_0^{t_{II}'}$



6.7 Визначаємо значення ентальпії газоподібного палива

$$\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\wedge} = \bar{C}_H \Big|_0^{t_H^{\wedge}} \cdot t_H^{\wedge},$$

6.8 Порівнюємо значення $\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\wedge}$ та D , якщо виконується умова

$$\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\wedge} < D$$

6.9 Перезадаємось температурою попереднього підігріву газоподібного палива $t_H^{\prime\prime} = t_H^{\wedge} + 100$

6.10 Визначаємо теплоємність газоподібного палива $\bar{C}_T \Big|_0^{t_H^{\prime\prime}}$

6.11 Визначаємо значення ентальпії газоподібного палива

$$\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\prime\prime} = \bar{C}_H \Big|_0^{t_H^{\prime\prime}} \cdot t_H^{\prime\prime}$$

6.12 Порівнюємо значення $\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\prime\prime}$ та D , якщо виконується умова

$$\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\prime\prime} > D$$

6.13 Визначаємо дійсне значення температури попереднього підігріву газоподібного палива

$$t_H = t_H^{\wedge} + \frac{D - \left(\frac{H}{\phi} \right)^{\wedge}}{\left(\frac{H}{\phi} \right)^{\prime\prime} - \left(\frac{H}{\phi} \right)^{\wedge}} \cdot 100$$

6.14 Аналізуємо температури

—якщо $t_H \leq 1200^{\circ}\text{C}$ - то приймаємо $t_B = 1200^{\circ}\text{C}$, $t_H \leq 1200^{\circ}\text{C}$, бажано, щоб $t_B \approx t_H$, можна перезадатися температурами t_B і t_H , в цьому випадку висота регенераторів для підігріву компонентів горіння палива буде приблизно однаковою.

—якщо $t_H > 1200^{\circ}\text{C}$, то робимо висновок, що газоподібне паливо нам не підходить, так як не можна досягти заданої температури $t_{розр}$, а відповідно і необхідної температури поверхні матеріалу $t_m^{нов}$.

Необхідно пам'ятати, що:

—якщо t_B і $t_H \leq 450^{\circ}\text{C}$ - теплообмінник можна виготовити зі звичайної маловуглецевої сталі.

—якщо t_B і $t_H = 750..800^{\circ}\text{C}$ - теплообмінник виготовляють з легованої сталі, Ni та $Cr \approx 30\%$



—якщо t_B і $t_{II} > 800^\circ\text{C}$ - теплообмінник виготовляють з керамічних матеріалів (наприклад використовують восьмигранні карбошамотні труби або використовують регенеративний підігрів).

Запитання для самоконтролю.

1. Дайте визначення калориметричної температури горіння палива.
2. Записати рівняння теплового балансу для визначення калориметричної температури горіння палива та пояснити величини які в нього входять.
3. Методика визначення калориметричної температури горіння палива.
4. Дайте визначення жаропродуктивної температури горіння палива.
5. Записати рівняння теплового балансу для визначення жаропродуктивної температури горіння палива та пояснити величини які в нього входять.
6. Методика визначення жаропродуктивної температури горіння палива.
7. Дайте визначення теоретичної температури горіння палива.
8. Записати рівняння теплового балансу для визначення теоретичної температури горіння палива та пояснити величини які в нього входять.
9. Що таке коефіцієнт тепловиділення?
10. Методика визначення теоретичної температури горіння палива.
11. Що таке пірометричний коефіцієнт?
12. Пояснити фізичний зміст пірометричного коефіцієнту.
13. Чому рівні затрати теплоти на дисоціацію водяної пари та двоокису вуглецю?
14. Як визначити необхідність попереднього підігріву компонентів горіння палива?



5. ДІАГРАМА I-t ПОВНОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА

5.1. Призначення I-t діаграми повного горіння палива

При теплових розрахунках установок, які працюють на одному виді палива, часто доводиться визначати тепловміст (ентальпію) продуктів згоряння при різних температурах, а також калориметричну температуру горіння палива при різних температурах попереднього підігріву компонентів горіння.

Для полегшення цієї задачі можна один раз побудувати діаграму I-t повного горіння палива. Затрата часу на її побудову окупиться при подальших розрахунках.

Діаграма I-t повного горіння палива призначена для:

1. Визначення тепловмісту продуктів згоряння палива при різних значеннях коефіцієнтів надлишку повітря (α) по їх температурі.
2. Визначення калориметричної температури горіння палива (t_K) в залежності від температури попереднього підігріву повітря (паливо холодне).
3. Визначення калориметричної температури горіння палива (t_K) в залежності від температури попереднього підігріву палива (повітря холодне).
4. Визначення калориметричної температури горіння палива (t_K) в залежності від температури попереднього підігріву палива і повітря одночасно.
5. Визначення тепловмісту $1 \text{ кг} \left(\text{м}^3 \right)$ палива в залежності від його температури.
6. Визначення тепловмісту теоретично необхідної кількості повітря в залежності від його температури (при $\alpha = 1,0$).
7. Зображення і аналізу процесів, які протікають при зміні температури і тепловмісту продуктів згоряння палива.

Необхідно пам'ятати, що побудованою діаграмою можна користуватися лише для даного складу палива. Діаграма I-t представляє собою систему координат по осі абсцис якої відкладені значення температури продуктів згоряння палива, а по осі ординат відкладене значення ентальпії продуктів згоряння палива, загальний вид діаграми наведений на рис.5.1.



5.2. Послідовність побудови I-t діаграми повного горіння палива

Загальний вид діаграми наведений на рис.5.1, послідовність побудови діаграми наступна:

1. Побудова кривої $I_{np.зг} = \varphi(t_{np.зг.})$ при $\alpha = 1,0$

–при 0°C $I_{np.зг.}^o = 0$

–при 500°C $I_{np.зг.}^o = V_{np.зг.}^o \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{500} \cdot 500$

–при 1000°C $I_{np.зг.}^o = V_{np.зг.}^o \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{1000} \cdot 1000$, і т.д.

Через отримане значення точок $I_{np.зг.}^o$ проводимо криву, крива зображується на графіку тільки до останньої визначеної точки.

2. Побудова кривої $I_{np.зг} = \varphi(t_{np.зг.})$ при $\alpha = 2,5$

–при 0°C $I_{np.зг.}^d = 0$

–при 500°C $I_{np.зг.}^d = V_{np.зг.}^d \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{500} \cdot 500$

–при 1000°C $I_{np.зг.}^d = V_{np.зг.}^d \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{1000} \cdot 1000$, і т.д.

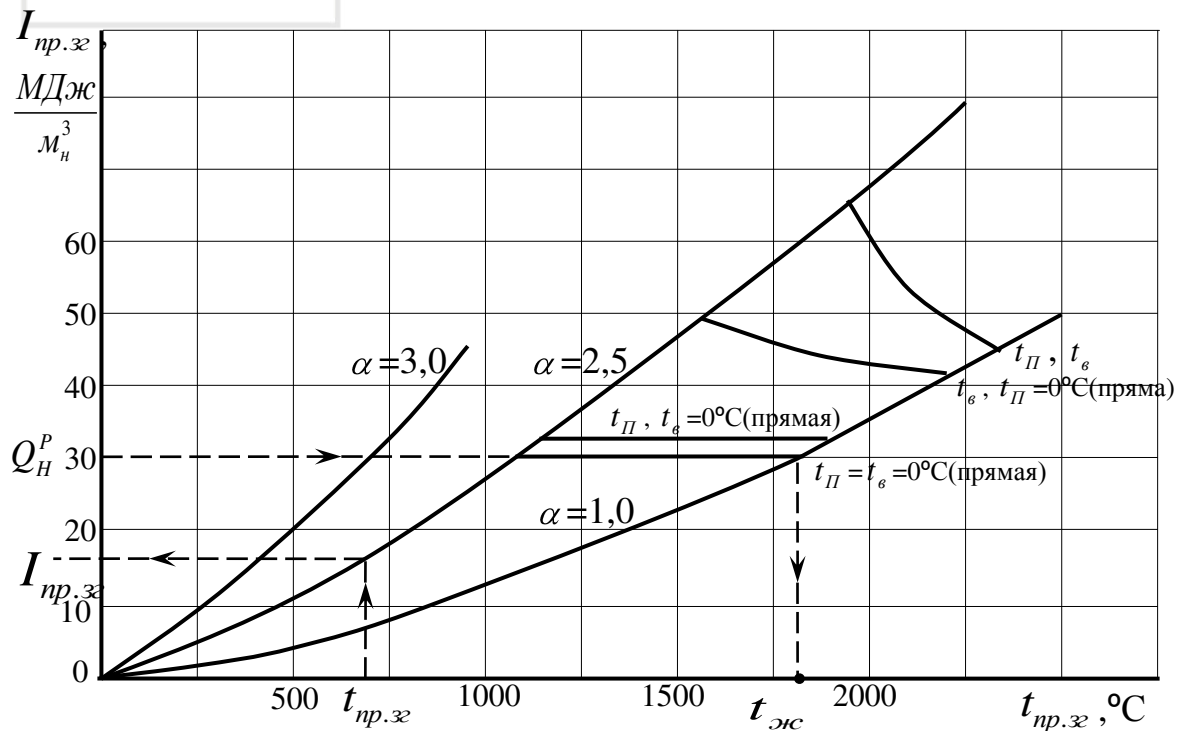


Рис. 5.1. Діаграма I-t повного горіння палива



3. Визначаємо жаропродуктивну температуру горіння палива $t_{ж}$
($t_B = t_{II} = 0^\circ C$, $\alpha = 1,0$)

$$t_{ж} = \frac{Q_H^P}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}},$$

Вираховуємо значення нижчої теплоти згорання палива Q_H^P і відкладаємо це значення на шкалі ординат $I_{np.32}$, провівши з знайденої точки ізоентальпу до перетину з кривою $I_{np.32} = \varphi(t_{np.32})$ при $\alpha = 1,0$. З даної точки опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис та визначаємо жаропродуктивну температуру горіння палива. Порівнюємо дане значення жаропродуктивної температури з значенням визначеним аналітичним шляхом.

4. Побудова кривої попереднього підігріву палива (повітря яке поступає на горіння теоретично холодне $t_B = 0^\circ C$).

–при $\alpha = 1,0$ $t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^B + I_\phi^\Pi}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; I_\phi^B = 0, I_\phi^\Pi = \bar{C}_\Pi \cdot t_\Pi;$

–при $\alpha = 2,5$ $t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^\Pi}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; I_\phi^\Pi = \bar{C}_\Pi \cdot t_\Pi.$

Так як $Q_H^P + \bar{C}_\Pi \cdot t_\Pi = const$ то $I_{np.32} = const$, тобто це пряма лінія.

5. Побудова кривої попереднього підігріву повітря (паливо яке поступає на горіння теоретично холодне $t_{II} = 0^\circ C$)

–при $\alpha = 1,0$ $t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^B + I_\phi^\Pi}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; I_\phi^\Pi = 0, I_\phi^B = V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B;$

–при $\alpha = 2,5$ $t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^B}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; I_\phi^B = \alpha \cdot V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B.$

При збільшенні коефіцієнта надлишку повітря α , чисельник $Q_H^P + \alpha \cdot V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B$ збільшується, так як збільшується значення V_B^o . Крива буде вища, ніж при $t_\Pi, t_B = 0$, так як тепловміст повітря буде більший.

6. Побудова кривої попереднього підігріву повітря і палива одночасно t_B, t_Π .

–при $\alpha = 1,0$ $t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^B + I_\phi^T}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; I_\phi^B = V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B, I_\phi^\Pi = \bar{C}_\Pi \cdot t_\Pi;$



–при $\alpha = 2,5$
$$t_K = \frac{Q_H^P + I_\phi^B + I_\phi^T}{V_{np.32}^o \cdot \bar{C}_{np.32}}; \quad I_\phi^B = \alpha \cdot V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B, \quad I_\phi^П = \bar{C}_П \cdot t_П.$$

Чисельник виразу буде більший, ніж в попередньому випадку . а тому крива буде розміщена вище.

7. Побудова кривої залежності ентальпії повітря від температури попереднього підігріву повітря $I_\phi^B = \varphi(t_B)$.

–при $\alpha = 1,0$

$$I_\phi^B = V_B^o \cdot \bar{C}_B \cdot t_B.$$

Задаємося проміжними значенням температури попереднього підігріву повітря t_B , та при даній температурі визначаємо теплоємність повітря \bar{C}_B та значення ентальпії повітря I_ϕ^B . Графік будуємо в іншому масштабі, так як $I_\phi^B \ll I_{np.32}$.

8. Побудова кривої залежності ентальпії палива від температури попереднього підігріву палива $I_\phi^П = \varphi(t_П)$ для 1 кг або 1 м_H^3 палива.

$$I_\phi^П = \bar{C}_П \cdot t_П$$

Задаємося проміжними значенням температури попереднього підігріву палива $t_П$, визначаємо теплоємність палива $\bar{C}_П$ та значення ентальпії палива $I_\phi^П$. Графік будуємо разом з графіком $I_\phi^B = \varphi(t_B)$.

Загальний вигляд графіків наведений на рис.5.2.

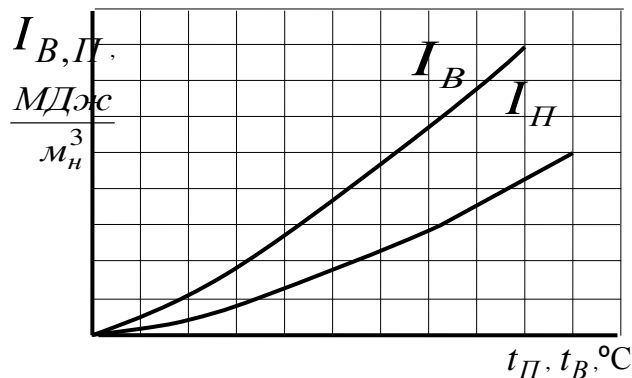


Рис. 5.2. Залежності I_ϕ^B і $I_\phi^П = \varphi$ і $t_П$



5.3. Процеси які зображуються на I-t діаграмі

На рис.5.3 зображені основні процеси які зображуються на I-t діаграмі.

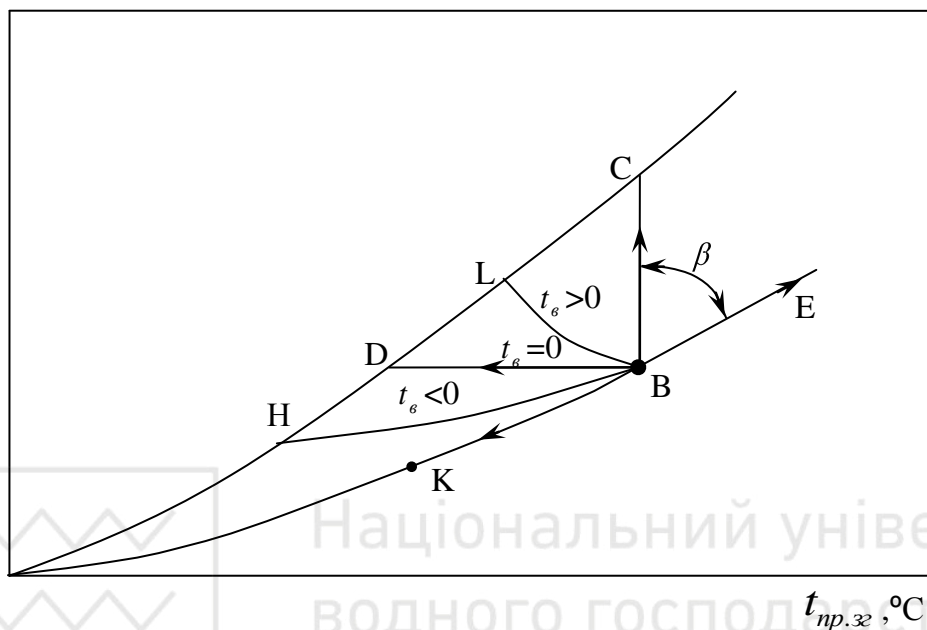


Рис. 5.3. Процеси, що зображуються на діаграмі

Лінія ВК – характеризує процес охолодження продуктів згоряння при проходженні їх по “щільному” газоходу, цей процес може бути використаний при розрахунку теплообмінних пристроїв, акумуляції теплоносія і т.д.

Лінія ВЕ – характеризує процес підігріву продуктів згоряння палива при проходженні їх по “щільному” газоходу за умови встановлення додаткового приладу (електронагрівач і т.п.) – нереальний процес.

Лінія ВD – характеризує процес охолодження продуктів згоряння палива при проходженні їх по “нешільному” газоходу (підсмоктування повітря) при температурі повітря, яке поступає на горіння, 0°C .

Лінія ВH – характеризує процес охолодження продуктів згоряння палива при проходженні їх по “нешільному” газоходу (підсмоктування повітря) при температурі повітря, яке поступає на горіння $t_B < 0^{\circ}\text{C}$.

Лінія ВL – характеризує процес охолодження продуктів згоряння палива при проходженні їх по “нешільному” газоходу (підсмок-



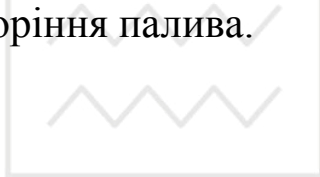
тування повітря) при температурі повітря, яке поступає на горіння $t_B > 0^\circ\text{C}$.

Процеси VD, VH, VL можуть бути використані при розрахунках печей, топків, отримання теплоносія із заданою температурою з продуктів згоряння палива (визначення необхідної кількості додаткового повітря для отримання заданої температури за різницею коефіцієнтів надлишку повітря при необхідній та початковій температурі).

Область обмежена кутом β – характеризує зростання коефіцієнта надлишку повітря α одночасно зі збільшенням температури гарячого дуття – нереальна зона.

Запитання для самоконтролю.

1. Призначення I-t діаграми повного горіння палива.
2. Зобразити загальний вид I-t діаграми повного горіння палива.
3. Послідовність побудови I-t діаграми повного горіння палива.
4. Зобразити та пояснити основні процеси на I-t діаграмі повного горіння палива.





6. НЕПОВНЕ ГОРІННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

6.1. Неповне горіння палива без утворення сажистого вуглецю

Неповне горіння палива без утворення сажистого вуглецю використовується для отримання продуктів згоряння палива, які не містять кисню. Такі продукти згоряння можна використовувати для нагріву без окислення різних металів і сплавів.

Для здійснення неповного горіння палива без утворення сажистого вуглецю необхідно створити добрі умови для підготовки початкової суміші палива і окислювача: ретельне змішування компонентів горіння і попередній їх підігрів. Сажистий вуглець не утворюється при згорянні палива при температурах в зоні горіння $t_{розр} \geq 1500^\circ\text{C}$. Розрахунки краще проводити для 100 м_H^3 палива.

При неповному горінні палива без утворення сажистого вуглецю будуть мати місце такі умови згоряння

$$V_{np.зг} = V_{CO_2 \text{ np.зг}} + V_{CO \text{ np.зг}} + V_{H_2O \text{ np.зг}} + V_{H_2 \text{ np.зг}} + V_{N_2 \text{ np.зг}}^{II+B}, \quad (6.1)$$

Як видно з формули 6.1 кисень в продуктах згоряння відсутній, проте з'являються оксид вуглецю і водень які не згоріли.

Позначимо продукти неповного горіння ($\alpha < 1,0$):

$$V_{CO_2 \text{ np.зг}} = x, \frac{M_H^3}{M_{H_{n-ва}}^3};$$

$$V_{CO \text{ np.зг}} = y, \frac{M_H^3}{M_{H_{n-ва}}^3};$$

$$V_{H_2O \text{ np.зг}} = z, \frac{M_H^3}{M_{H_{n-ва}}^3};$$

$$V_{H_2 \text{ np.зг}} = u, \frac{M_H^3}{M_{H_{n-ва}}^3}.$$

Складемо три рівняння матеріальних балансів для 100 м_H^3 палива. В лівій частині матеріальних балансів розмістимо продукти згоряння, а в правій – компоненти газоподібного палива. Матеріальні баланси запишемо по вуглецю, водню і кисню. Для наглядно-



сті і спрощення позначень формулу 6.1 запишемо в наступному вигляді

$$V_{пр.зг}^{H.G} = x + y + 2z + 2u + V_{N_2}^{II+B} = 2x + y + z + V_{N_2}^{II+B}, \quad (6.2)$$

Для прикладу подальших розрахунків прийнемо наступний склад палива:

$CH_4; C_2H_6; C_3H_8; C_4H_{10}; CO_2; N_2; H_2O; O_2$ (сума компонентів палива має бути рівною 100%).

Тоді рівняння матеріальних балансів для нашого палива будуть мати наступний вигляд:

- по вуглецю

$$x + y = CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10}, \quad (6.3)$$

- по водню

$$2z + 2u = 4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} + 2 \cdot H_2O, \quad (6.4)$$

- по кисню

$$2x + y + z = 2 \cdot CO_2 + H_2O - 2 \cdot O_2 + 2 \cdot 0,21 \cdot \alpha^{H.G} \cdot V_B^O, \quad (6.5)$$

де 0,21 – вміст кисню в повітрі по об'єму;

$\alpha^{H.G}$ - коефіцієнт витрати повітря при неповному горінні $\alpha^{H.G} < 1,0$;

V_B^O - теоретично необхідна кількість повітря, яке необхідне для спалювання 100 м_H^3 палива (при $\alpha = 1,0$, повітря вологе d_B).

Для розв'язку трьох рівнянь матеріальних балансів з чотирма невідомими x, y, u, z складаємо четверте рівняння. Четверте рівняння запишемо, виходячи зі значення константи хімічної рівноваги для реакції



$$K_c^V = \frac{CO_2 \cdot H_2}{CO \cdot H_2O} = \frac{x \cdot u}{y \cdot z}, \quad (6.7)$$

де K_c^V - константа хімічної рівноваги по концентрації, яка залежить від розрахункової температури в зоні горіння і визначається за таблицями.

Отже, ми отримали чотири рівняння з чотирма невідомими. Підставимо значення компонентів палива в праві частини рівнянь матеріальних балансів і значення константи хімічної рівноваги K_c .

Отримаємо



$$\left. \begin{aligned} x + y &= A \\ 2z + 2u &= B \\ 2x + y + z &= C \\ \frac{x \cdot u}{y \cdot z} &= D \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

де A, B, C, D – значення правих частин матеріальних балансів і константи хімічної рівноваги по концентрації K_c^V відповідно.

Розв'язуємо систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими і визначаємо значення x, y, u, z , $\frac{M_H^3}{100M^3_{H_{n-ва}}}$,

де $x = CO_2$, $y = CO$, $u = H_2$, $z = H_2O$.

Вираховуємо значення об'єму азоту, який знаходиться в паливі та повітрі $V_{N_2}^{II+B}$ з формули 6.1

$$V_{N_2}^{II+B} = V_{N_2}^{II+B} = V_{N_2}^{II} + V_{N_2}^B, \quad (6.9)$$

де $V_{N_2}^{II}$ – кількість азоту, яка міститься в $100 M_H^3$ палива, беремо зі складу нашого палива у % або $\frac{M_H^3}{100M^3_{H_{n-ва}}}$;

$V_{N_2}^B$ – кількість азоту, яка міститься в повітрі, $\frac{M_H^3}{100M^3_{H_{n-ва}}}$;

$$V_{N_2}^B = 0,79 \cdot \alpha^{H_2} \cdot V_B^O = E, \quad (6.10)$$

Після розрахунків отримаємо кінцевий стан продуктів неповного горіння палива в перерахунку на $100 M_H^3$ палива.

$$x = CO_2, \quad y = CO, \quad z = H_2O, \quad u = H_2, \quad V_{N_2} = E.$$

Розділивши значення на 100 отримаємо склад продуктів неповного горіння на $1 M_H^3$ палива.

Приклад 6.

Вихідні дані:

1. Склад палива:



$$CH_4 = 89,9\%$$

$$C_2H_6 = 3,1\%$$

$$C_3H_8 = 0,9\%$$

$$C_4H_{10} = 0,4\%$$

$$CO_2 = 0,3\%$$

$$N_2 = 5,4\%$$

$$\overline{\sum} = 100\%$$

2. Коефіцієнт витрати палива, $\alpha = 0,5$;

3. Вологовміст палива, $d_{II} = 8 \frac{\text{г}}{\text{м}_H^3}$;

4. Вологовміст повітря, $d_B = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}_H^3}$;

5. Пірометричний коефіцієнт, $\mu = 0,6$;

6. Температура попереднього підігріву повітря, $t_B = 800^\circ\text{C}$;

7. Температура попереднього підігріву палива, $t_{II} = 20^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Перераховуємо склад палива на вологий газ (перерахунок не наводиться)

$$CH_4 = 89,0143\%$$

$$C_2H_6 = 3,0695\%$$

$$C_3H_8 = 0,8911\%$$

$$C_4H_{10} = 0,3961\%$$

$$CO_2 = 0,297\%$$

$$N_2 = 5,3468\%$$

$$H_2O = 0,9852\%$$

$$\overline{\sum} = 100\%$$

2. Виконуємо розрахунок горіння палива при $\alpha = 1,0$; повітря вологе ($d_B = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}_H^3}$). Розрахунок доцільно проводити на ЕОМ за програмою "PAL2".

Визначаємо:



-теоретично необхідний об'єм повітря для повного спалювання 1 м_H^3 палива та інші величини, необхідні для визначення калориметричної температури горіння палива, t_K :

$$V_B^O = 9,4361 \text{ м}_H^3 / \text{м}_H^3$$

- значення калориметричної температури горіння палива

$$t_K = 2637,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- розрахункову температуру горіння палива

$$t_{розр} = t_K \cdot \mu = 2637,25 \cdot 0,6 = 1582,35^\circ\text{C}$$

3. Введемо позначення.

$$x = \text{CO}_2, \quad y = \text{CO}, \quad z = \text{H}_2\text{O}, \quad u = \text{H}_2.$$

4. Записуємо рівняння теплового балансу.

$$V_{np.3z}^{H.\Gamma} = \underbrace{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}}}_{x+y} + \underbrace{V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2}}_{z+u} + V_{\text{N}_2}^{T+B}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{2x+y+z}$$

5. Складемо три рівняння теплових балансів.

-по вуглецю

$$x + y = \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} =$$

$$= 89,0143 + 2 \cdot 3,0695 + 3 \cdot 0,8911 + 4 \cdot 0,3961 = 99,411 \frac{\text{м}_H^3}{100 \text{м}_H^3};$$

-по водню

$$2z + 2u = 4 \cdot \text{CH}_4 + 6 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 10 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 2 \cdot \text{H}_2\text{O} =$$

$$= 4 \cdot 89,0143 + 6 \cdot 3,0695 + 8 \cdot 0,8911 + 10 \cdot 0,3961 + 2 \cdot 0,9852 = 387,534 \frac{\text{м}_H^3}{100 \text{м}_H^3};$$

по кисню

$$2x + y + z = 2 \cdot \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \cdot 0,21 \cdot \alpha^{H.\Gamma} \cdot V_B^O =$$

$$= 2 \cdot 0,297 + 0,9852 + 2 \cdot 0,21 \cdot 0,5 \cdot 943,61 = 199,74 \frac{\text{м}_H^3}{100 \text{м}_H^3};$$

6. Визначаємо за таблицями при $t_{розр} = 1582,35^\circ\text{C}$ константу хімічної рівноваги по концентрації

$$K_C = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 0,2517$$

7. Розв'язуємо систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими



$$\begin{cases} x + y = 99,411; \\ 2z + 2u = 387,534; \\ 2x + y + z = 199,74; \\ \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 0,2517 \end{cases}$$

Обрахунки доцільно проводити на ЕОМ за програмою “URNEPROG”.

Результати розрахунку:

$$y_1 = 83,295; \quad x = 16,116; \quad z = 84,213; \quad u = 109,554; \quad y_2 = 307,579.$$

Перевіряємо $\frac{x \cdot u}{y_1 \cdot z} = \frac{16,116 \cdot 109,554}{83,295 \cdot 84,213} = 0,2517$

Другий корінь $y_2 = 307,579$ нам не підходить.

8. Визначаємо об'єм азоту $V_{N_2}^{П+B}$

$$V_{N_2}^{П+B} = V_{N_2}^{П} + V_{N_2}^{B} = 5,3468 + 0,79 \cdot 0,5 \cdot 943,61 = 378,07 \frac{м^3}{100м^3};$$

9. Склад продуктів неповного горіння на $100 м^3_H$ палива

$$x = CO_2 = 16,116 \frac{м^3}{100м^3};$$

$$y = CO = 83,295 \frac{м^3}{100м^3};$$

$$z = H_2O = 84,213 \frac{м^3}{100м^3};$$

$$u = H_2 = 109,554 \frac{м^3}{100м^3};$$

$$N_2 = 378,07 \frac{м^3}{100м^3};$$

10. Остаточний склад продуктів неповного горіння на $1 м^3_H$ палива



$$CO_2 = 0,16 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

$$CO = 0,83 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

$$H_2O = 0,84 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

$$H_2 = 1,09 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

$$N_2 = 3,78 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

$$V_{пр.зг}^{H.Г} = 6,7 \frac{M_H^3}{M_H^3};$$

11. Склад продуктів неповного горіння у % .

$$CO_2 = \frac{0,16 \cdot 100}{6,7} = 2,39\%;$$

Аналогічно визначаємо решту величин

$$CO = 12,39\%;$$

$$H_2 = 16,27\%;$$

$$H_2O = 12,54\%;$$

$$N_2 = 56,41\%.$$

Перевіряємо, щоб сума компонентів продуктів неповного горіння складала 100%

$$CO_2 + CO + H_2O + H_2 + N_2 = 2,39 + 12,39 + 12,54 + 16,27 + 56,41 = 100\%.$$

6.2. Неповне горіння палива з утворенням сажистого вуглецю

Неповне горіння палива з утворенням сажистого вуглецю використовується з метою отримання сажі, яка використовується для виробництва автопокришок, фарб і ін.

Процес неповного горіння палива з утворенням сажистого вуглецю протікає при розрахунковій температурі $t_{розр} < 1100^\circ C$. Як і для процесу неповного горіння палива без утворенням сажистого вуглецю, необхідна ретельна підготовка горючої суміші з попереднім підігрівом компонентів згорання.



При згорянні, на відміну від п.6.1, мають місце такі реакції:



Запишемо склад продуктів неповного горіння для нашого випадку.

$$V_{пр.зг}^{H.Г} = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2O} + V_{H_2} + V_{CH_4} + V_{N_2}, \quad (6.12)$$

Визначаємо склад продуктів неповного горіння і кількість сажі, яка утворилась, на прикладі.

Приклад 7.

1. Вихідні дані.

1.1 Склад газоподібного палива для спрощення приймемо абсолютно сухим.

$$CH_4 = 89,9\%; \quad N_2 = 5,4\%;$$

$$C_2H_6 = 3,1\%; \quad CO = 0\%;$$

$$C_3H_8 = 0,9\%; \quad H_2S = 0\%;$$

$$C_4H_{10} = 0,4\%; \quad H_2 = 0\%;$$

$$CO_2 = 0,3\%; \quad O_2 = 0\%.$$

1.2 Вологовміст газу, $d_{Г} = 12 \frac{г H_2O}{м^3}$.

1.3 Розрахункова температура горіння палива, $t_{розр} = 927^{\circ}C$.

1.4 Коефіцієнт витрати повітря, $\alpha^{H.Г} = 0,4$.

2. Розв'язання

2.1 Перевіряємо правильність задання складу палива

$$\sum_{i=1}^6 V_i = 89,9 + 3,1 + 0,9 + 0,4 + 0,3 + 5,4 = 100\%.$$

2.2 Теоретично необхідна кількість повітря (визначаємо за спрощеною методикою).

$$V_B^O = 4,76 \left[0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + \sum \left(m_i + \frac{n_i}{4} \right) \cdot C_m H_n + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \right] \quad (6.13)$$

де m_i і n_i - коефіцієнти, що визначаються з структурних формул вуглеводнів $C_m H_n$.

Тоді отримаємо



$$V_B^O = 4,76 \left[2 \cdot 89,9 + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 3,1 + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,9 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,4 \right] = 941,29 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

Всі розрахунки, як і в п. 6.1 проводимо на $100M_H^3$ палива.

2.3 Дійсна кількість повітря при неповному горінні.

$$V_B^d = \alpha^{H.G} \cdot V_B^O, \quad (6.14)$$

$$V_B^d = 0,4 \cdot 941,29 = 376,5 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

2.4 Кількість продуктів неповного горіння

- азоту

$$V'_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha^{H.G} \cdot V_B^O + N_2, \quad (6.15)$$

де N_2 - кількість азоту в паливі, $\frac{M_H^3}{100M_H^3}$

$$V'_{N_2} = 0,79 \cdot 0,4 \cdot 941,29 + 5,4 = 302,85 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

- диоксида вуглецю

$$V'_{CO_2} = \alpha \left[CO + CH_4 + \sum m_i + C_m \cdot H_n + H_2S + CO_2 - x \right], \quad (6.16)$$

де x - кількість двоокису вуглецю, яка прореагувала з C до $2CO$ за рівнянням ($CO_2 + C = 2CO$)

$$V'_{CO_2} = 0,4 \left[9,9 + 2 \cdot 3,1 + 3 \cdot 0,9 + 4 \cdot 0,4 + 0,3 + x \right] = 40,46 - x, \quad \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

- оксиду вуглецю

$$V'_{CO} = 2 \cdot x, \quad (6.17)$$

- дійсна кількість водяної пари

$$V'_{H_2O} = \alpha \left[H_2 + 2 \cdot CH_4 + \sum \frac{n_i}{2} C_m H_n + H_2S + 0,016 \cdot V_B^O \right] + 0,124 \cdot d_{\Gamma}, \quad (6.18)$$

$$V'_{H_2O} = 0,4 \cdot \left[2 \cdot 89,9 + \frac{6}{2} \cdot 3,1 + \frac{8}{2} \cdot 0,9 + \frac{10}{2} \cdot 0,4 + 0,016 \cdot 941,29 \right] + 0,124 \cdot 12 =$$

$$= 85,392 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

- метану

$$V'_{CH_4} = \alpha \cdot CH_4 - y, \quad (6.19)$$



де y - кількість метану, який розпався на $2H_2$ та C по реакції
($CH_4 \rightarrow C_{II} + 2H_2$)

$$V'_{CH_4} = (-0,4) \cdot 0,89 - y = 53,94 - y \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

- ВОДНЮ

$$V'_{H_2} = (-\alpha) \left[H_2 + \sum \frac{n_i}{2} \cdot C_m H_n \right] + 2 \cdot y, \quad (6.20)$$

$$V'_{H_2} = (-0,4) \left[\frac{6}{2} \cdot 3,1 + \frac{8}{2} \cdot 0,9 + \frac{10}{2} \cdot 0,4 \right] + 2 \cdot y = 8,94 + 2 \cdot y \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

2.5 Константа хімічної рівноваги по концентрації K_C^{IV} для реакції
 $CH_4 \rightarrow 2H_2 + C_{II}$

Визначаємо за таблицями при $t_{розр} = 927^\circ C = 1200K$: $K_C^{IV} = 0,0166$

$$K_C^{IV} = \frac{V'_{CH_4}}{V'_{H_2}^2}, \quad (6.21)$$

$$K_C^{IV} = \frac{53,94 - y}{(8,94 + 2y)^2} = 0,0166$$

Із цієї залежності визначаємо значення y

$$53,94 - y = 0,0166 \cdot (8,94 + 2y)^2;$$

$$0,0664 \cdot y^2 + 1,594y - 53,346 = 0;$$

$$y = \frac{-1,594 + \sqrt{2,54 + 4 \cdot 0,0664 \cdot 53,346}}{2 \cdot 0,0664} = 18,78 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

2.6 Дійсна кількість водню в продуктах неповного горіння палива.

$$V''_{H_2} = V'_{H_2} = 8,49 + 2y = 8,94 + 2 \cdot 18,78 = 46,5 \frac{M_H^3}{100M_H^3}$$

2.7 Константа хімічної рівноваги K_C^V для реакції $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + 2H_2O$.

Визначаємо за таблицями при $t_{розр} = 927^\circ C = 1200K$: $K_C^V = 0,7162$

$$K_C^V = \frac{V'_{CO_2} \cdot V_{H_2}}{V'_{CO} \cdot V_{H_2O}}, \quad (6.22)$$

$$K_C^V = \frac{(0,46 - x) \cdot 46,5}{2 \cdot x \cdot 85,392} = 0,7162$$

Із цієї залежності визначаємо значення x



$$40,46 - x \cdot 46,5 = 122,315 \cdot x;$$

$$168,815 \cdot x = 1881,39;$$

$$x = \frac{1881,39}{168,815} = 11,14 \frac{M_H^3}{100 M_H^3}$$

2.8 Кінцевий склад продуктів неповного горіння палива

- оксиду вуглецю

$$V_{CO} = \frac{V'_{CO}}{100} = \frac{2 \cdot x}{100} = \frac{2 \cdot 11,14}{100} = 0,223 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- диоксида вуглецю

$$V_{CO_2} = \frac{V'_{CO_2}}{100} = \frac{40,46 - x}{100} = \frac{40,46 - 11,14}{100} = 0,293 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- азоту

$$V_{N_2} = \frac{V'_{N_2}}{100} = \frac{302,85}{100} = 3,028 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- водяної пари

$$V_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{100} = \frac{85,4}{100} = 0,854 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- метану

$$V_{CH_4} = \frac{V'_{CH_4} - y}{100} = \frac{53,94 - 18,78}{100} = 0,352 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- водню

$$V_{H_2} = \frac{V''_{H_2}}{100} = \frac{46,5}{100} = 0,465 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

- загальний склад продуктів неповного згорання палива

$$\begin{aligned} V_{np.зг}^{H.\Gamma} &= V_{CO} + V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{CH_4} + V_{H_2} = \\ &= 0,223 + 0,293 + 3,028 + 0,854 + 0,352 + 0,465 = 5,215 \frac{M_H^3}{M_H^3} \end{aligned}$$

2.9 Склад продуктів неповного горіння палива у %.

$$V_{CO}^{\%} = \frac{V_{CO} \cdot 100}{V_{np.зг}^{H.\Gamma}} = \frac{0,223 \cdot 100}{5,215} = 4,28\%$$

Аналогічно



$$V_{CO_2}^{\%} = 5,62\%;$$

$$V_{N_2}^{\%} = 58,06\%;$$

$$V_{H_2O}^{\%} = 16,37\%;$$

$$V_{CH_4}^{\%} = 6,75\%;$$

$$V_{H_2}^{\%} = 8,92\%.$$

Перевіряємо $\sum_{i=1}^6 V_i^{\%} = 4,28 + 5,62 + 58,06 + 16,37 + 6,75 + 8,92 = 100\%$.

2.10 Кількість сажистого (дисперсного) вуглецю в грамах на 1 м_H^3 палива. Кількість сажистого (дисперсного) вуглецю визначається на основі реакції

$$C_m H_n = \frac{n}{2} \cdot H_2 + m \cdot C_{II} \quad (6.23)$$

- визначаємо кількість кіломолей вуглецю m_C на 1 м_H^3 палива і множимо їх на масу 1 кмоля вуглецю, яка складає $12,01 \text{ кг}$

$$C_T = 12,01 \left[\left(-\alpha^{H.G} \right) \sum \frac{m_i C_m H_n}{22,4} + \frac{\Delta V_{CH_4} - 0,5 \cdot V'_{CO}}{22,4} \right], \quad (6.24)$$

де ΔV_{CH_4} - об'єм метану, який розклався (початковий об'єм мінус кінцевий об'єм)

$$\begin{aligned} C_T &= 12,01 \left[\left(-\alpha^{H.G} \right) \sum \frac{m_i C_m H_n}{22,4} + \frac{\left(-\alpha^{H.G} \right) CH_4 - V_{CH_4} \cdot 100 - 0,5 \cdot 2 \cdot x}{22,4} \right] = \\ &= 12,01 \left[\left(-0,4 \right) \left(\frac{2 \cdot 3,1 + 3 \cdot 0,9 + 4 \cdot 0,4}{22,4} \right) + \frac{\left(-0,4 \right) 89,9 - 0,352 \cdot 100 - 0,5 \cdot 2 \cdot 11,14}{22,4} \right] = \\ &= 120,1 \left(0,28125 + 0,3393 \right) = 74,46 \frac{\text{г}}{\text{м}_H^3} \end{aligned}$$

- кількість сажистого вуглецю на 1 м_H^3 продуктів згорання, C'_T .

$$C'_T = \frac{C_T}{V_{H.G. пр.зг}}, \quad (6.25)$$

$$C'_T = \frac{74,46}{5,215} = 14,28 \frac{\text{г}}{\text{м}_H^3}$$

2.11 В результаті розрахунку отриманий наступний склад продуктів неповного горіння палива і величини C_T і C'_T .



$$V_{CO} = 4,28\% \quad V_{H_2O} = 16,37\%;$$

$$V_{CO_2} = 5,62\%; \quad V_{CH_4} = 6,75\%;$$

$$V_{N_2} = 58,06\%; \quad V_{H_2} = 8,92\%.$$

$$C_T = 74,46 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \text{палива}$$

$$C'_T = 4,28 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \text{продуктів згоряння}$$

Перевіряємо $\sum_{i=1}^6 V_i = 4,28 + 5,62 + 58,06 + 16,37 + 6,75 + 8,92 = 100\%.$

Запитання для самоконтролю.

1. З якою метою використовують неповне горіння палива?
2. Записати склад продуктів неповного згоряння палива з утворенням та без утворення сажистого вуглецю.
3. Які реакції горіння мають місце при неповному горінні палива з утворенням та без утворення сажистого вуглецю?
4. Пояснити зміст константи хімічної рівноваги для реакцій неповного горіння палива з утворенням та без утворення сажистого вуглецю.



7. ПРИСТРОЇ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА

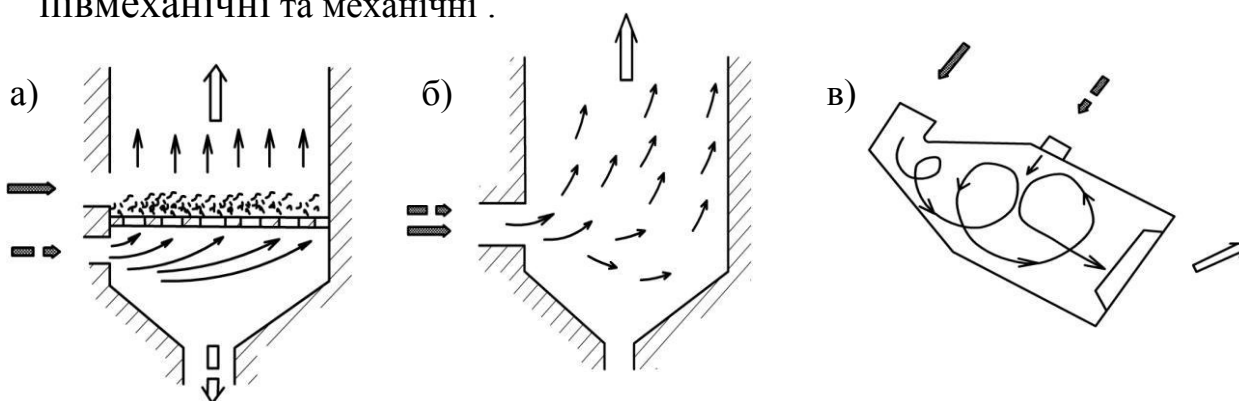
7.1. Топки для спалювання твердого, рідкого та газоподібного палива

Топковим пристроєм (топкою) називається пристрій, в якому проводиться спалювання палива. Конструктивно ці пристрої повинні відповідати вимогам:

- стійкість процесу горіння і його температурного режиму;
- економічність спалювання палива;
- зручність організації горіння (подача палива, повітря, видалення золи та шлаку) і обслуговування топки (чистка, ремонт).

Топки класифікуються:

- *по способу спалювання палива*: шарові (рис.7.1 а), камерні (факельні) (рис.7.1 б), вихрові (циклонні) (рис.7.1 в). В шарових топках в шарі спалювання тільки тверде паливо. В інших топках спалюють рідке і газоподібне паливо та тверде паливо у пило-видній формі;
- *по режиму подачі палива*: з періодичною і безперервною подачею;
- *по взаємодії з тепловими установками*: внутрішні – спалювання палива відбувається безпосередньо в тепловій установці, виносні – встановлюють зовні теплової установки, а в неї падають гарячі продукти згорання;
- *по способу подачі палива і організації обслуговування*: ручні, напівмеханічні та механічні .



а) шаровий; б) факельний; в) вихровий.

Рис. 7.1. Схема способів спалювання палива



Схеми топок представлені на рис. 7.2. Топки для шарового спалювання

палива мають такі різновидності: а) топки з нерухою колосниковою решіткою і нерухою шаром палива на ній (рис.7.2 а,б,в); б) топки з нерухою колосниковою решіткою та рухомим шаром палива на ній

(рис.7.2 г,д,е); в) топки з рухою колосниковою решіткою та нерухою шаром палива на ній (рис. 7.2 є,ж); Для факельного спалювання рідкого, газоподібного та твердого палива у пилевидній формі використовують камерні топки (рис.7.2 з,і).

Ручна топка з нерухою горизонтальною колосниковою решіткою

(рис.7.2а). Це найпростіший і найбільш розповсюджений тип топки. Являє собою камеру, виконану з будівельних матеріалів або металу з середини футеровану і вогнетривкими матеріалами. Топка розділена колосниковою решіткою 2 з вогнетривкого матеріалу на дві камери. Паливо закидається на колосникову решітку 2 у верхню камеру через отвір, який закривається дверцятами. Через цей отвір проводиться розпушування шару палива, що горить (шарування) та видалення шлаку та золи. Повітря подається через отвір, який розташований нижче колосникової решітки у нижню камеру. Кількість поданого повітря регулюється дверцятами, які закривають цей отвір, або спеціальними шиберами. У потужних топках повітря подається у цей отвір з допомогою дуттєвих вентиляторів. Через цей отвір видаляється також та частина шлаку і золи, яка провалюється через колосникову решітку.

Газоподібні продукти згоряння (димові гази) видаляються через димоходи,

вхід в які розташований у верхній частині топки. Для цього в топці створюється розрідження до 50–100 Па з допомогою димової труби при природній тязі та з допомогою вентилятора – димососа при створенні штучної тяги.

Ручні топки використовуються у теплових установках малої продуктивності.

Наприклад, в котельних агрегатах продуктивністю по водяній парі 1–2 м/год —. Показники роботи топок: $q_3 = 2 \div 4\%$; $q_4 = 7 \div 12\%$; $\alpha_T = 1,4 \div 1,5$



Застосування механічного закидувача 3 (рис. 7.2 б) дає можливість збільшити потужність топкок. Наприклад, в топках продуктивністю по водяній парі до 10 т/год .

Для спалювання бурого вугілля та низькоякісного кам'яного вугілля використовуються *топки з шуруючою планкою*. (рис. 7.2 в). Планка 4 виконана із сталі або чавуну у вигляді трьохгранної призми з виступом на кінці з кутами 35 і 15° до горизонту, що дає можливість переміщувати паливо із бункера, зіштовхувати шлак з колосникової решітки при русі планки вперед та розпушувати шар горіння палива при зворотному русі. Показники роботі топки: $q_3 \approx 1\%$; $q_4 = 4 \div 7\%$; $\alpha_T = 1,3 \div 1,4$

Топки з похилою колосниковою решіткою. (рис. 7.2 г). В них паливо завантажується з бункера та дозується за допомогою дозатора 5 і по мірі згорання пересипається під дією гравітаційних сил по похилій (близько 45°) колосниковій решітці 6. Такі топки використовують для спалювання торфу та відходів деревообробки.

В потужних топках використовуються рухомі колосникові решітки 8, які приводяться в дію механічним пристроєм 7, що дає можливість безперервно шурувати шар горіння.

Швидкісні шахтні топки системи В.В. Померанцева (рис. 7.2 е) використовується для спалювання кускового торфу для котлів продуктивністю до $6,5\text{ т/год}$.

Топки з рухомою колосниковою решіткою. До них відносять топки з механічною ланцюговою колосниковою решіткою 8 прямого (рис. 7.2 є) та зворотного (рис. 7.2 ж) руху. В топках з колосниковою решіткою прямого руху подача палива відбувається з бункера з допомогою дозатора 5. В топках зворотного ходу подача палива відбувається за допомогою закидувача 3. В обох видах топкок повітря подається через отвори 9, які розташовані під колосниковою решіткою 8. Такого типу топки використовуються для спалювання твердого палива в теплових установках середньої та високої потужності. Показники роботи топки: $q_3 = 0,5 \div 1\%$; $q_4 = 4 \div 5\%$; $\alpha_T = 1,3$.

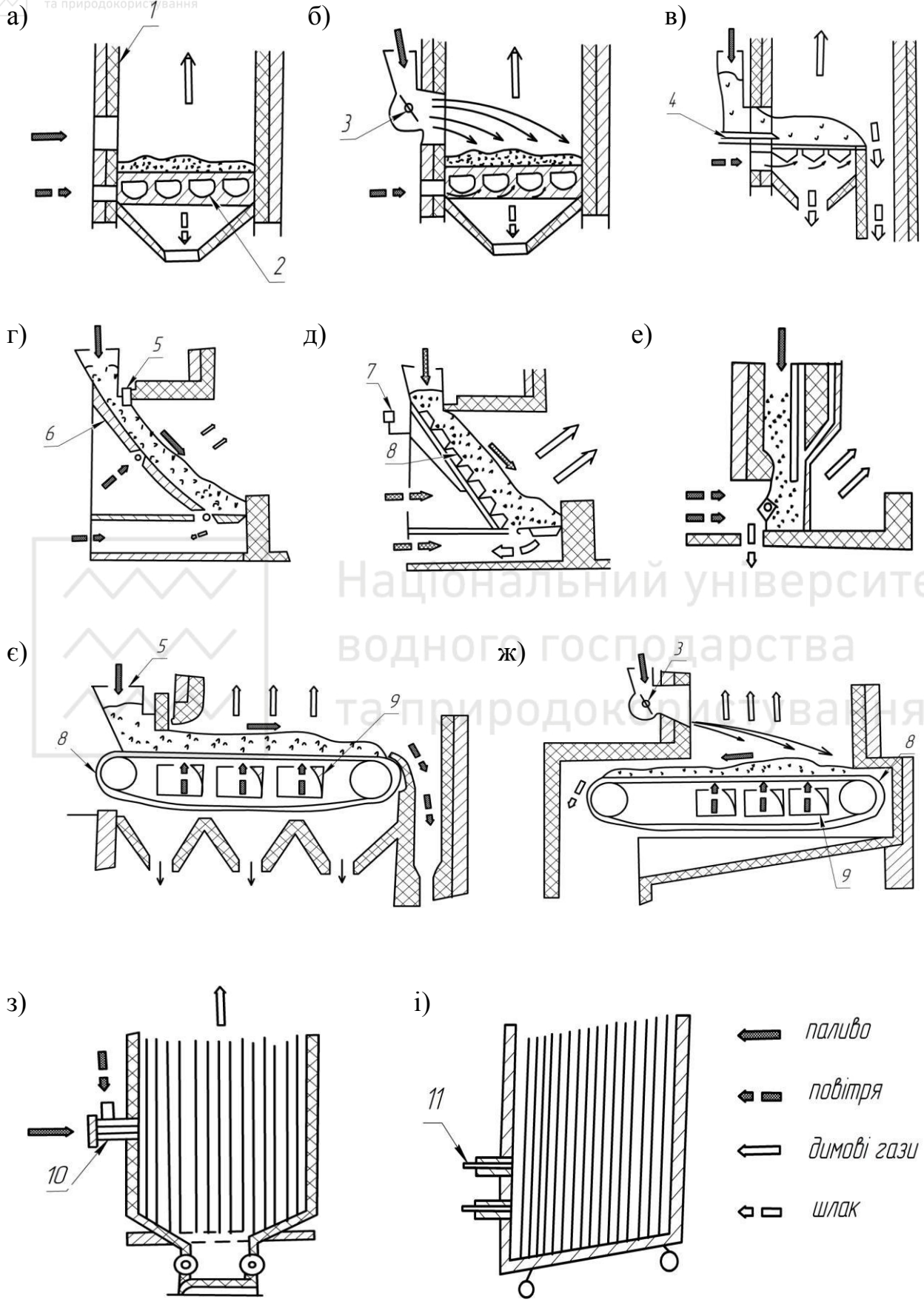


Рис. 7.2. Схеми топків



До недоліків шарових топок необхідно віднести:

- обмеження потужності топок через гетерогенний процес горіння;
- виникнення хімічного та механічного недопалу в шарі горіння;
- складність процесу автоматизації і т. д.

В камерних топках (рис. 7.2 а) спалюють окремі види твердого палива (антрацитовий, штиб, дрібні фракції іншого вугілля) в пилевидній формі. Для цього вугілля розмелюють до пилевидної форми у спеціальних млинах, а потім падають в топку через спеціальні пальники 10. При роботі в котельних агрегатах стіни топок покривають екраном із кип'ятильних трубок. Ці труби забирають значну кількість тепла та захищають стінки топки від перегріву. Показники роботи топки: $q_3 = 0 \div 1\%$; $q_4 = 0,5 \div 6\%$; $\alpha_T = 1,2 \div 1,25$.

Камерні топки для спалювання рідкого та газоподібного палива (рис. 7.2 і)

виконують з горизонтальним або похилим подом. Пальник 11 розміщують на передній, боковій стінці або кутах камери. Рідке та газоподібне паливо спалюють в топках будь-якої продуктивності. Тверде паливо у пилевидній формі спалюють в топках середньої та високої продуктивності.

Роботу топок оцінюють параметрами: тепловою потужністю, теплове навантаження колосникової решітки і топкового об'єму, коефіцієнт корисної дії.

Під *теплову потужність топки* розуміють кількість тепла Q , кВт, яка виділяється в ній за одиницю часу

$$Q = V_p Q_n^p, \quad (7.1)$$

де V_p - кількість палива, що спалюється за одиницю часу, кг/с;

Q_n^p - нижча теплота згорання палива, кДж/кг (Дж/м³).

Теплове навантаження на колосникову решітку (видиме теплове дзеркало горіння) Q/R , кВт/м² – це кількість тепла, яке виділяється з 1 м² площі колосникової решітки за одиницю часу (1с.)

$$\frac{Q}{R} = \frac{V_p Q_n^p}{R}, \quad (7.2)$$

де R - площа колосникової решітки в топці, на якій відбувається горіння.



Величина Q/R коливається в межах $100 - 1750 \text{ кВт/м}^2$.

Теплове навантаження топкового об'єму – це кількість теплоти, яка виділяється з одиниці об'єму камери топки за одиницю часу, кВт/м^3 .

$$\frac{Q}{V_\tau} = \frac{B_p Q_n^p}{V_n} = q, \quad (7.3)$$

де V_τ - об'єм топкового простору, де відбувається горіння, м^3 .

Величина q залежить від палива та конструкції топки і змінюються в межах $140 - 600 \text{ кВт/м}^3$: у шарових механізованих $q = 290 \div 465 \text{ кВт/м}^3$, для камерних топок при спалюванні вугільного пилу $q = 145 \div 230 \text{ кВт/м}^3$, при спалюванні газу і мазуту $q = 230 \div 460 \text{ кВт/м}^3$ і т. д.

Коефіцієнт корисної дії топки оцінює ефективність роботи топки

$$\eta_T = 100 - (q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (7.4)$$

При спалюванні рідкого та газоподібного палива

$$\eta_T = 100 - (q_3 + q_5), \quad (7.5)$$

де q_3 – втрати теплоти від хімічного недопалу, %;

q_4 – втрати теплоти від механічного недопалу, %;

q_5 – втрати теплоти в навколишнє середовище, через зовнішні огорожувальні конструкції топки, %;

q_6 – втрати теплоти з фізичним теплом шлаку.

Запитання для самоконтролю.

1. Перерахуйте вимоги які висувають до топок.
2. Класифікація топок.
3. Навести характеристику топок з нерухомою колосниковою решіткою та нерухомим шаром палива на ній.
4. Навести характеристику топок з нерухомою колосниковою решіткою та рухомим шаром палива на ній.
5. Навести характеристику камерних топок.
6. Основні параметри за якими оцінюють роботу топки.



7.2. Пристрої для спалювання газоподібного палива (пальники)

Пристрої для спалювання палива призначені для створення сприятливих умов з метою перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію, необхідну для здійснення заданих технологічних режимів в робочому просторі вогнетехнічних установок.

Спосіб спалювання палива визначається видом палива і призначенням вогнетехнічної установки.

Пристрої для спалювання палива та їх розміщення в установці повинні забезпечувати:

1. Підтримання в робочому просторі установки необхідної температури.
2. Необхідний характер зміни температури по довжині і ширині робочого простору.
3. Такий характер розподілення продуктів згоряння і теплообмін в робочому просторі, який є для даної установки оптимальним.
4. Можливість використання попередньо нагрітих компонентів горіння палива.
5. Надійність експлуатації і зручність обслуговування установки.
6. Повноту згоряння палива в межах робочого простору установки.
7. Можливість здійснення автоматизації технологічного процесу.

Пальниками називаються пристрої, призначені для спалювання горючого газу.

Основним призначенням пальника є організація процесу горіння таким чином, щоб забезпечити найбільш економічний заданий режим роботи.

При спалюванні газоподібного палива мають місце цілий ряд переваг в порівнянні зі спалюванням твердого або рідкого палива.

1. Легкість здійснення заданого температурного режиму.
2. Можливість попереднього підігріву газоподібного палива.
3. Краща рівномірність розподілу температур в продуктах згоряння і робочому просторі.
4. Скорочення витрат на обслуговування вогнетехнічної установки.
5. Легкість транспортування палива.
6. Відсутність складського господарства.
7. Зменшення витрати електроенергії.
8. Зменшення габаритів установки.



9. Сприятливість здійснення процесу автоматизації.

Основні вимоги до пальників.

1. Підвід і змішування між собою в необхідній кількості компонентів горіння, забезпечення заданої теплової потужності.
2. Забезпечити повне згоряння палива в межах робочого простору установки.
3. Мати факел, який необхідний для здійснення заданого по технологічним умовам рівня теплопередачі в робочому просторі.

Крім того, пальник повинен зручно виготовлятися; забезпечувати легкість регулювання; не мати важкодоступних місць, які потребують обслуговування; мати якомога менші габарити і вагу; виготовлятися із недорогих і недефіцитних матеріалів.

Процес горіння робочої суміші можна умовно розділити на три етапи: змішування компонентів горіння, горіння суміші і теплопередачу.

Класифікація пальників.

Основна ознака, по якій класифікуються пальники – спосіб змішування палива і окислювача. По цій ознаці пальники можна розділити на такі групи:

1. Пальники з повним попереднім змішуванням палива і окислювача.
2. Пальники з частковим попереднім змішуванням палива і окислювача.
3. Пальники з зовнішнім змішуванням.

До першої групи відносяться пальники, які забезпечують повне змішування палива і окислювача (повітря) ще до входу в робочий простір або топку установки. В зону горіння подається готова горюча суміш. Горіння при цьому носить кінетичний характер.

Пальники з повним попереднім змішуванням отримали назву *безполум'яневі*. Факел у такого пальника володіє великою випромінювальною здатністю, але радіація такого факела швидко падає зі збільшенням відстані.

В пальниках з частковим попереднім змішуванням до палива підводиться тільки частина окислювача, а вторинний окислювач поступає безпосередньо в зону горіння.

В пальниках з зовнішнім змішуванням утворення горючої суміші проходить в одному об'ємі з процесом горіння. При цьому горіння носить дифузійний характер. Факел в таких пальниках добре видний. Виходячи з цього пальники отримали назву *полум'яневі*. Зі

збільшенням яскравості факела збільшується його степінь чорноти, так як збільшується коефіцієнт випромінювання факела.

Для збільшення яскравості факела іноді в зону горіння додають інші види палива, наприклад мазут.

Схеми сумішоутворення представлені на рис. 7.3.

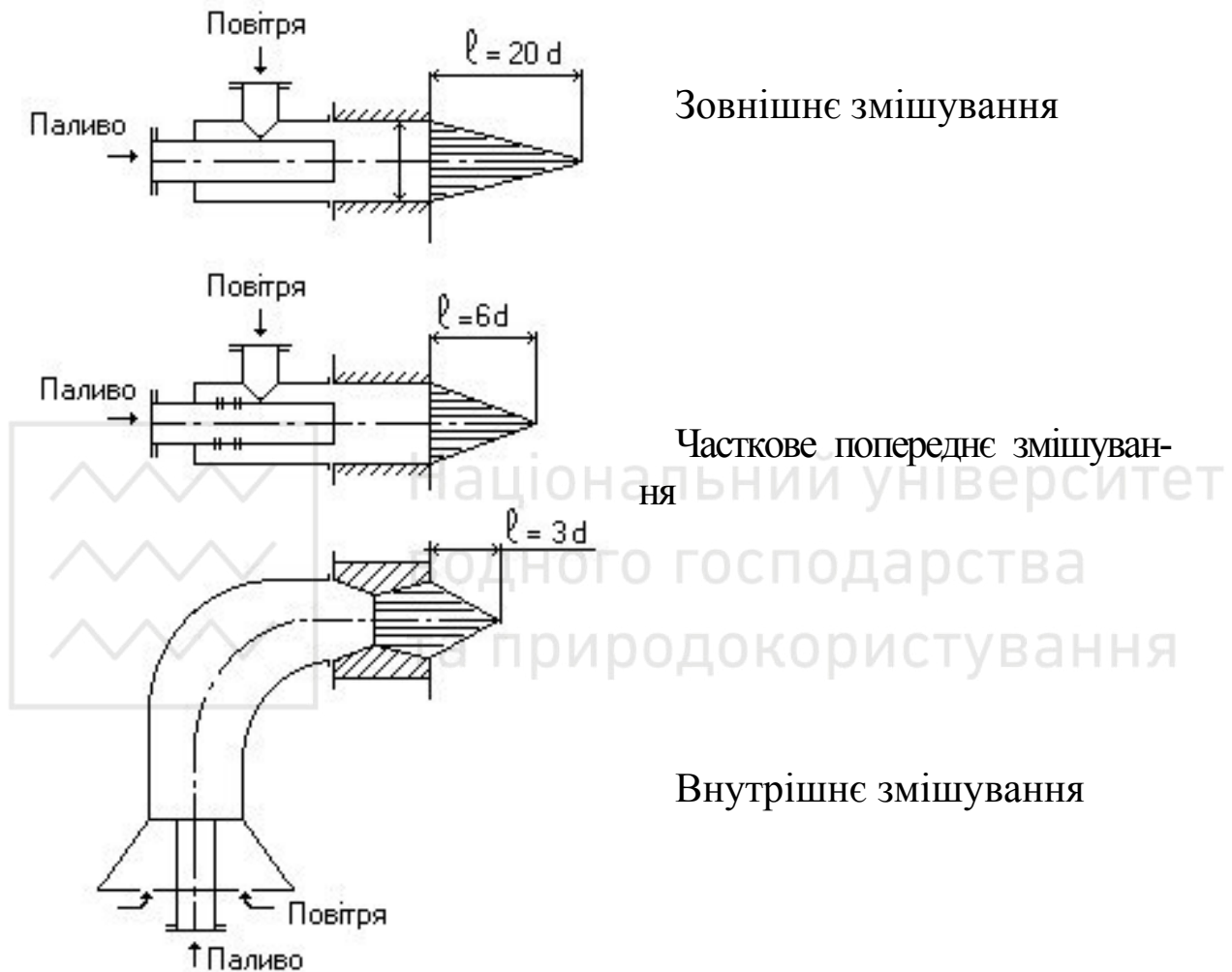


Рис. 7.3. Схеми сумішоутворення

Іншими признаками класифікації є:

1. Тиск газу.

- пальники низького тиску до $P_{зал} \leq 5 \text{кПа}$;
- середнього тиску $5 \text{кПа} < P_{зал} < 0,3 \text{МПа}$;
- високого тиску $0,3 \text{МПа} < P_{зал} < 1,2 \text{МПа}$;

2. Степінь очистки газу.

- пальники для спалювання очищеного газу;
- пальники для спалювання забрудненого газу.

3. Матеріал для виготовлення пальника

- металічні;
- керамічні;
- цегляні.

Найменший факел мають пальники з повним попереднім змішуванням (внутрішнє змішування). Вони отримали назву *інжекторні* пальники або безполум'яні. Інжекторні пальники потребують спеціального пристрою – змішувача, який може являтися частиною самого пальника або виготовлятися окремо. В останньому випадку один змішувач може обслуговувати кілька пальників.

Схема інжекторного пальника представлений на Рис.7.4.

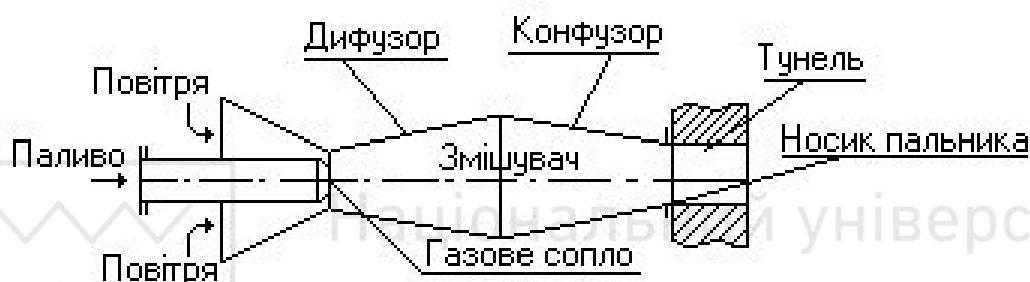


Рис. 7.4. Схема інжекторного пальника

Повітря в пальник всмоктується з навколишнього середовища. В тунелі горюча суміш підігрівається і згорає.

Довжина змішувача має бути до 7 калібрів (діаметра на вході в змішувач). Матеріалами для виготовлення тунелю служать вогнетривки, які витримують високі температури при згорянні суміші з коефіцієнтом витрати повітря $\alpha = 1,01 \dots 1,02$. В процесі горіння стінки тунелю розжарюються, що забезпечує стійке горіння. Зміна складу матеріалу тунелю не впливає на процес горіння.

Основною перевагою інжекторних пальників являється автоматичне регулювання співвідношення газ – повітря, так як при збільшенні продуктивності (витрати газу) зростає інжекційний ефект і збільшується витрата повітря.

Велике значення має тиск газу, при якому він поступає в змішувач. Якщо тиск газу такий, при якому швидкість виходу горючої суміші з носика пальника менша, ніж швидкість горіння суміші, то горіння перейде в змішувач (“проскок” полум'я або факела) і змішувач вийде з ладу, якщо він не охолоджується. Якщо тиск газу буде занадто великий, то факел може “відірватися” від носика пальника, що знизить ефективність її роботи або виникне згасання. Звичайно



залишковий тиск газу в інжекторних пальниках лежить в межах $5\text{кПа} \dots 0,1\text{МПа}$. Величину залишкового тиску газу в інжекторних пальниках можна знизити до 1кПа , якщо на виході із носика встановити керамічну перфоровану вставку або пакет пластин з зазором $1,5\text{ мм}$.

Другою перевагою інжекторних пальників являється можливість попереднього підігріву компонентів горіння палива, що дуже важко для “бідних” газів, наприклад, для доменного. Але занадто великий підігрів може привести до горіння в змішувачі. Для доменного газу температурна межа підігріву складає 673 К .

Використання інжекторних пальників дозволяє відмовитися від повітрепровода і вентилятора, якщо пальник працює на холодному дутті.

Теплова одинична потужність інжекторних пальників від $0,1$ до 1 МВт (в окремих випадках може досягати до 10 МВт). Швидкість горючої суміші на виході з носика в перерахунку на температуру $0\text{ }^\circ\text{C}$ повинна бути $20 - 50\text{ м/с}$.

При всіх відмічених перевагах інжекторні пальники мають недоліки:

1. Малі межі регулювання.
2. Великі розміри пальника (змішувача) при великих продуктивностях.
3. Неможливість змінити склад палива (Q_H^P) без зміни діаметра газового сопла.

Інжекторні пальники можуть працювати разом з керамічними рекуператорами без примушеної подачі повітря.

Пальник, який ми розглянули, називають ще однопровідною. Існують двоховідні інжекторні пальники у яких інжектуючим середовищем являється повітря. До таких пальників підводяться дві трубки – для подачі газу і повітря. Використовуються такі пальники в тих випадках, коли залишковий тиск газу дуже малий і наближується до атмосферного, наприклад, в скидних газах, які являються горючими.

В якості прикладу розглянемо конструкцію інжекційного панельного безфакельного пальника інституту Гіпронафтомаш. Схема пальника представлена на рис 7.5.

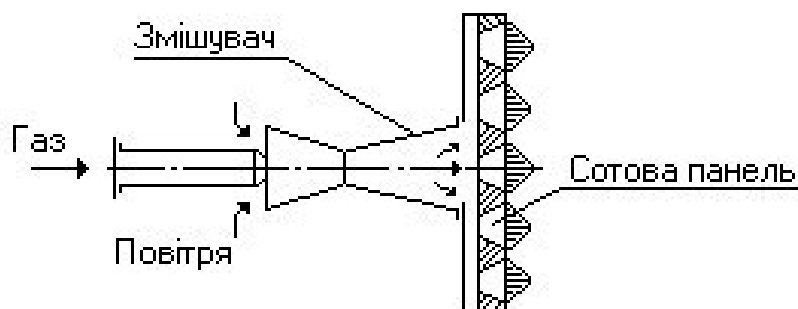


Рис. 7.5. Схема панельного без факельного пальника.

Перевага панельного пальника в тому, що сотові панелі, які мають вигляд зрізаної призми $35 \times 35 \times 115$ мм і, виконані з кераміки, нагріваються і інтенсивно випромінюють енергію. Панелі можуть встановлюватися прямо в кладку і випромінююча поверхня може бути будь-якою. При тепловій потужності пальника $0,2 \text{ MWt}$ число панелей складає 100 штук, при цьому довжина змішувача всього 380 мм. Тиск газу перед пальником (залишковий) складає $1 - 50 \text{ кПа}$.

Аналогічні переваги має чашоподібний керамічний пальник (див. рис.7.6.).

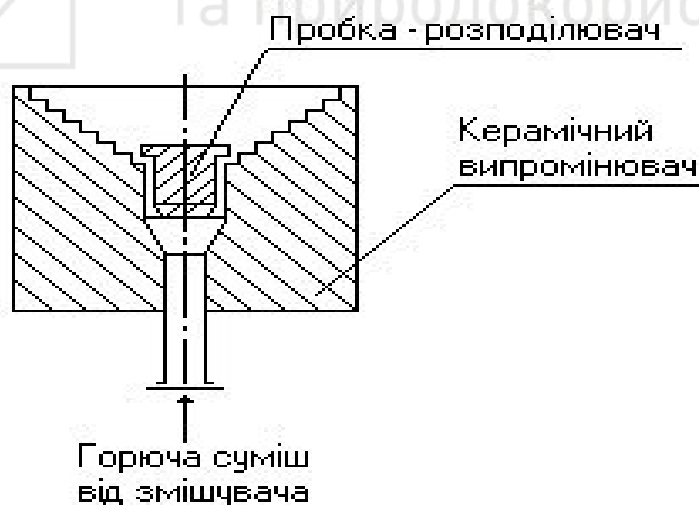


Рис. 7.6. Чашоподібний керамічний пальник

Горюча суміш піднімається по газовому каналу і поступає в пробку – розподільувач, де створюється багато газових струменів діаметром $0,5 - 1$ мм. Керамічний випромінювач нагрівається до температури 1700°C . Продуктивність однієї секції складає 1 м^3_{H} газу за годину, залишковий тиск газу перед пальником до 30 кПа .



Панельні і чашоподібні інжекційні пальники служать для рівномірного розподіленого нагріву низькотемпературних поверхонь або для розподіленого нагріву деталей. Наприклад, за допомогою таких пальників можна виконувати термообробку листової сталі, яка рухається паралельно і близько від випромінювальної поверхні. виконувати термообробку листової сталі, яка рухається паралельно і близько від випромінювальної поверхні.

До третьої групи пальників (по класифікації) відносяться пальники, які отримали дуже широке розповсюдження на установках різного призначення. В пальниках з зовнішнім змішуванням в залежності від конструкційного виконання довжина факела може змінюватися в дуже широких межах. Загальним для цих пальників є те, що газ і повітря подаються по окремим каналам до виходу з пальника. Перемішування газу і повітря здійснюється після виходу з пальника в робочому просторі (точки) установки. Для забезпечення необхідної повноти згоряння коефіцієнт залишку повітря складає $\alpha = 1,1 \dots 1,15$ і більше.

Схеми підводу газу і повітря в пальниках з зовнішнім змішуванням представлені на рис.7.7.

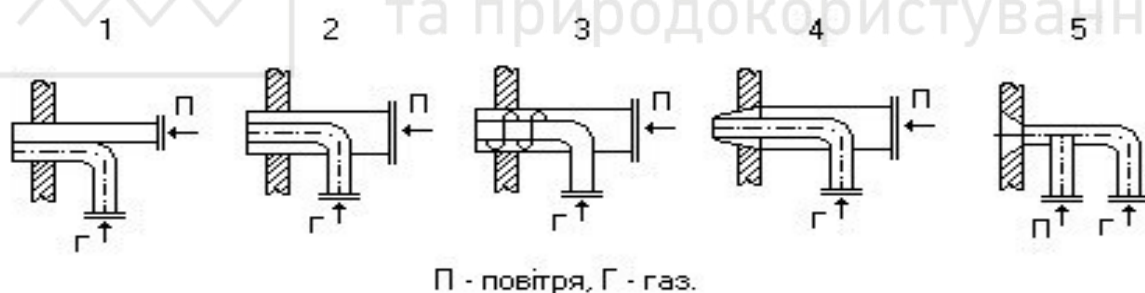


Рис. 7.7. Схеми підводу газу і повітря в пальниках з зовнішнім змішуванням

В приведених конструкціях на рис.7.7. довжина факела зменшується від поз. 1 до 5. Випадки 2...4 відповідають широко розповсюдженим пальникам типу “труба в трубі”, поз. 5 – турбулентним пальникам.

Пальники з зовнішнім змішуванням (полум’яневі) доцільно використовувати при висококалорійному паливі при необхідності концентрованого підводу теплоти при невеликій кількості пальників. В пальниках з зовнішнім змішуванням найбільш легко здійснювати перехід від одного виду газоподібного палива до іншого. В якості недоліків можна відмітити:



1. Високе значення коефіцієнта надлишку повітря, що призводить до зайвої витрати палива.
2. Для подачі повітря необхідний вентилятор.
3. Для регулювання співвідношення кількості повітря і палива при зміні навантаження, а також при запуску необхідний спеціальний пристрій – *регулятор співвідношення*.

Розглянемо деякі конструкції пальників з зовнішнім змішуванням. Пальник типу “труба в трубі”.

Пальник часто називають двохпроводним. Він простий в конструкції і дешевий у виготовленні. Виготовляється цей пальник з двох литих деталей із сірого або ковкого чавуну.

Схема пальника типу “труба в трубі” представлена на рис.7.8.



Рис. 7.8. Схема пальника типу “труба в трубі”

Пальники можуть працювати при невеликому тиску палива і мають широкі межі регулювання. Швидкість суміші в усті пальника може змінюватись від 10 до 50 м/с при залишковому тиску газу від 0,1 кПа до 4,9 кПа. Тиск газу і повітря приймається на 30–40 % більше відповідного динамічного напору в перерізі F_G і F_P (див. Рис.7.8). В пальнику потрібно притримуватись рекомендованих значень F_P / F_G , які залежать від виду палива.

$$\text{Змішаний газ } Q_H^P = 3,77 \dots 5,86 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} \quad F_P / F_G = 1,1$$

$$\text{Коксовий газ } Q_H^P = 5,86 \dots 8,38 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} \quad F_P / F_G = 1,9$$

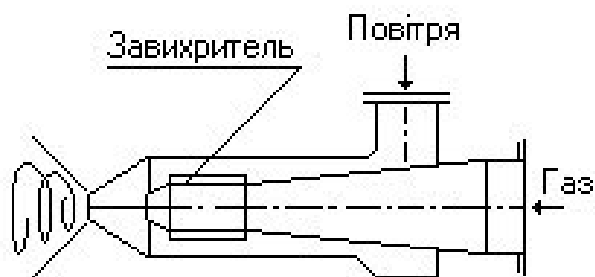
$$\text{Природний газ } Q_H^P = 30 \dots 35 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} \quad F_P / F_G = 14$$

Розміри пальника невеликі. Відношення довжини пальника до діаметра 7:5. Пальники можуть працювати на підігрітих компонентах горіння. Довжина факела велика (20d), тому вони використо-

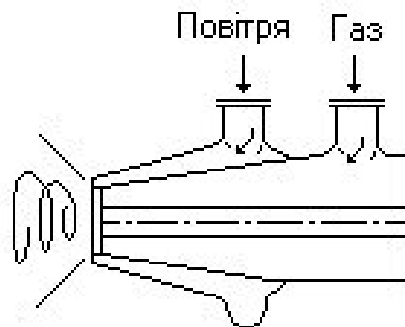


вуються в установках, де тепловиділення від факела повинно бути розтягнуте по довжині робочого простору.

Іншими представниками пальників з зовнішнім змішуванням є *турбулентні* пальники. Схеми пальників інституту Теплопроекту і Стальпроекту представлені на рис.7.9.



Конструкція інституту Теплопроекту



Конструкція інституту Стальпроекту

Рис. 7.9. Схеми турбулентних пальників

В турбулентних пальниках повітря поступає тангенціально по відношенню до газового струменя, завдяки чому покращується турбулізація факела, а відповідно, і перемішування компонентів горіння.

В пальнику конструкції інституту Стальпроекту обертальний рух повітря досягається завдяки равликopodobному корпусу. Пальник працює на газоподібному паливі з $Q_H^P = 3,77 \dots 8,3 \frac{МДж}{м_н^3}$, дов-

жина факела 7...10 діаметра гирла, швидкість газоповітряної суміші в гирлі пальника 15 – 40 м/с. При швидкості 40 м/с залишковий тиск газу і повітря складає 4,9 – 6,9 кПа.

В пальнику конструкції Теплопроекту обертальний рух повітря досягається за рахунок установки завихрювача. Залишковий тиск газу 0,5 – 0,8 кПа, повітря до 2,0 кПа. Для зниження тиску газу доцільно встановити діафрагму (звужуючий пристрій).

Продуктивність турбулентних пальників, що серійно випускаються заводами, складає до $200 м_н^3 / год$ для природного газу і $200 м_н^3 / год$ для генераторного газу. Довжина факела складає 12...15 діаметра гирла. Компоненти горіння можна попередньо підігрівати. Кут розкриття факела складає до 90° .



Недоліком пальників є дещо підвищений тиск повітря для створення крутки.

Перевагами пальників є:

1. Добре змішування газу і повітря при порівняно низьких тисках газу і повітря.
2. Порівняно мала довжина факела.
3. Можливість роботи на підігрітих компонентах горіння.

Ще одним представником пальників з зовнішнім змішуванням є *пальники з регульованою довжиною факела*. Схема такого пальника представлена на рис. 7.10. В деяких випадках необхідно виміряти витрату газу. При цьому вимірюється швидкість виходу газу і повітря, а також довжина факела, що може привести до зміни температури по довжині робочого простору. Пальники з регульованою довжиною факела ліквідують цей недолік. До пальника підводиться первинний і вторинний газ. Первинний поступає через центральне сопло, а вторинний через шість бокових, осі яких співпадають з отворами для проходу повітря. Якщо в пальник подається тільки первинне повітря, то факел розтягнутий за рахунок поганого змішування. При подачі тільки вторинного газу факел короткий за рахунок кращого змішування. З допомогою регулювання первинного і вторинного газу добиваються необхідної довжини факела.

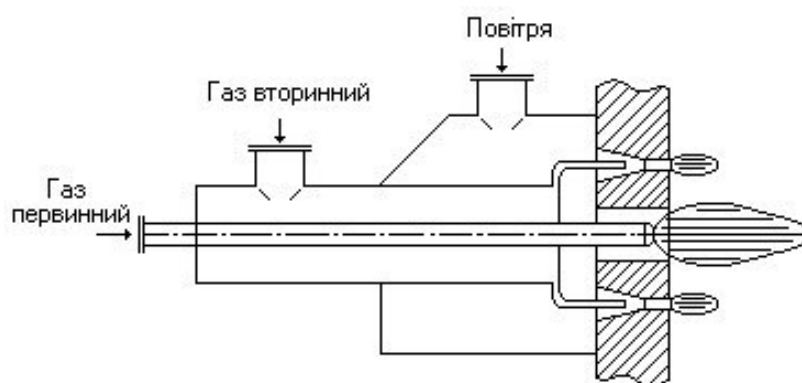


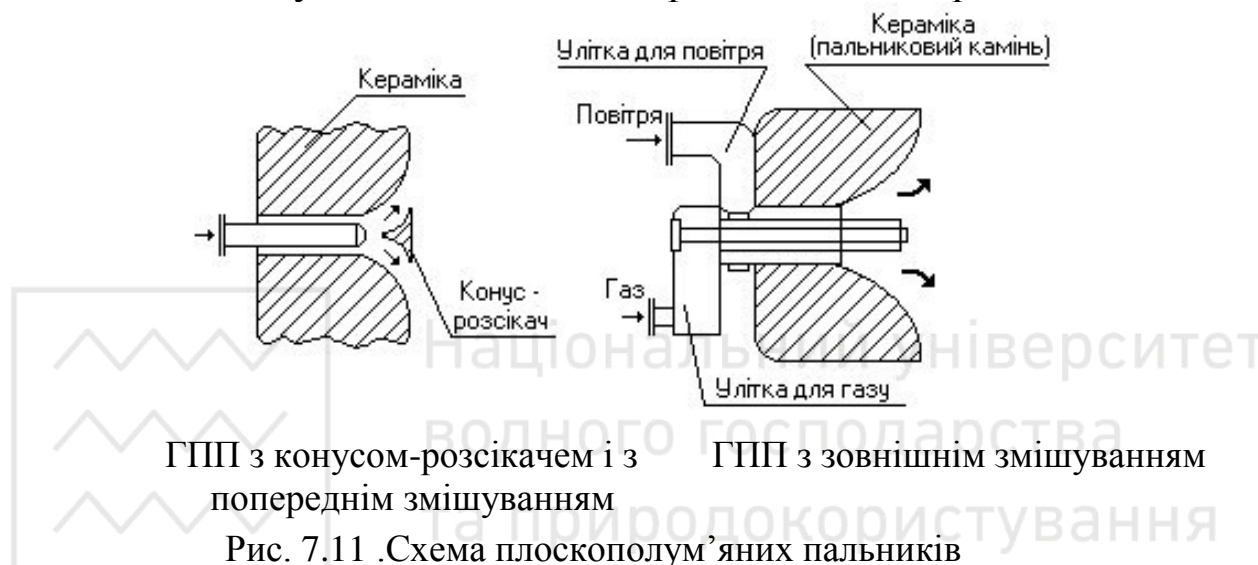
Рис. 7.10. Схема пальника з регульованою довжиною факела

В останній час все ширше використовується непрямий нагрів матеріалу. Роль пальника в цьому випадку заключається в нагріві кераміки, яка являється частиною самого пальника. Кераміка нагрівається до високої температури і інтенсивно випромінює тепло на нагріваємый виріб. Для виготовлення кераміки широко використовується алунд або муліт. Полум'я пальників, призначених



для нагріву кераміки, або в окремих випадках – склепіння робочого простору, має бути тонким (плоским) і направлено паралельно поверхні яка нагрівається. Внаслідок цього такі пальники отримали назву *плоскополум'яних*. Для створення плоского полум'я по поверхні кераміки або зводу в плоскополум'яних пальниках (ГПП) використовується закрутка газового і повітряного потоків, спеціальні розсікачі або спеціальна конфігурація тунелю пальникового каменя.

Схема плоскополум'яних пальників представлена на рис.7.11.



В плоскополум'яних пальниках з конусом-розсікачем найбільш вразливим елементом являється сам розсікач, так як в пальник поступає горюча суміш з $\alpha = 1,02 - 1,04$, тобто мають місце найбільш високі температури горіння палива. Крім того, конус піддається динамічному навантаженню факела, а тому виготовляється конус з дуже термостійких матеріалів, однак строк його роботи незначний і його часто міняють.

Пальник ГПП з зовнішнім змішуванням, розроблений інститутом газу АН України, оснащена двома равликами для повітря і газу. Закручені потоки повітря і газу забезпечують добре змішування на виході. Полум'я за рахунок центробіжних сил тонке і стелиться вздовж поверхні пальникового каменя, нагріваючи його.

Крім розглянутих основних конструкцій пальників використовуються спеціальні типи.



В якості прикладу розглянемо деякі з них.

“Атакуючі” пальники (див.рис.7.12).

Пальники працюють зі швидкістю витоку продуктів згоряння із камери згоряння близько 200 м/с і дозволяють здійснювати місцевий підігрів матеріалу шляхом конвективної тепловіддачі за рахунок того, що робочий канал має форму сопла Лаваля.

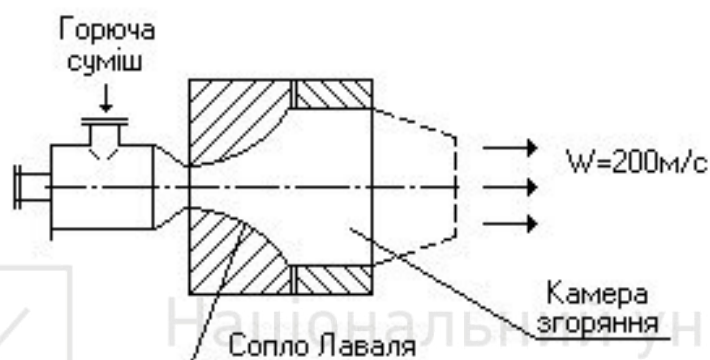


Рис. 7.12. Схема “атакуючого” пальника

Пальник з насадженням на факел електричного змінного поля (див.рис.7.13).

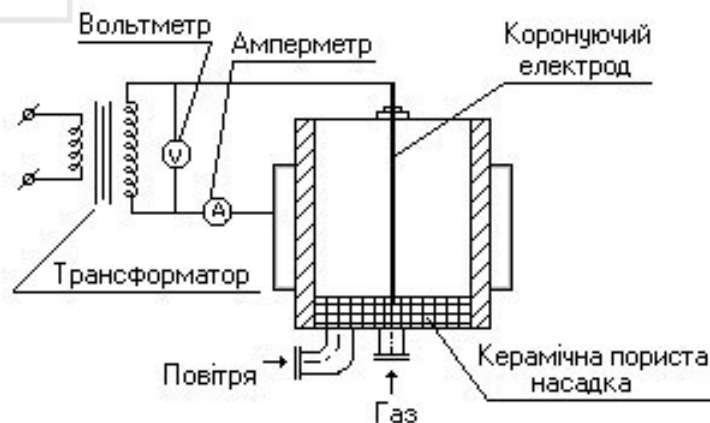


Рис. 7.13. Схема пальника насадженням на факел електричного змінного поля

Робота пальника ґрунтується на тому принципі, що при високій температурі продукти згоряння іонізуються і стають електропровідними. При продуктивності пальника $0,3 \text{ МВт}$ необхідна електрична потужність 100 кВт при напрузі 10 квольт . Використовується пальник для отримання температури продуктів згоряння порядку $3000 \text{ }^\circ\text{C}$.



Виносний вихровий пальник з форкамерою.

В тих випадках, коли в робочому просторі немає сприятливих умов для спалювання палива (шахтні печі, чавуннолитейні вагранки і ін.) встановлюються виносні пальники з форкамерою. Схема такого пальника представлена на рис.7.14.

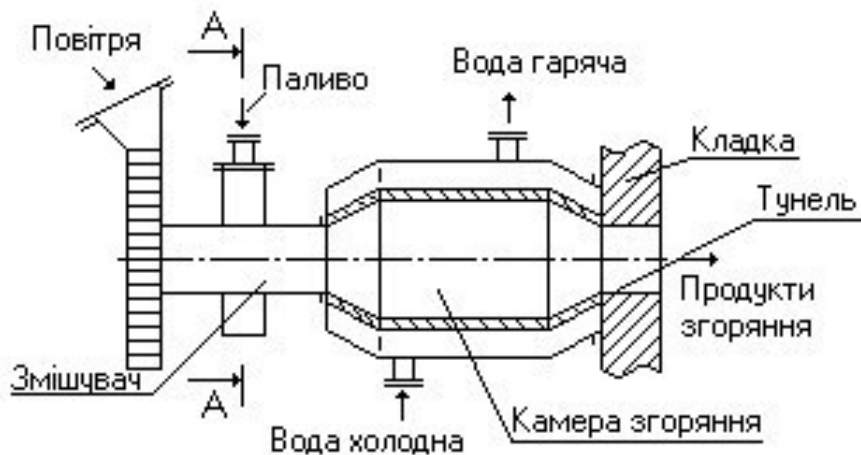


Рис. 7.14. Схема виносного вихрового пальника з форкамерою

Схема виносного вихрового пальника з високофорсованою камерою згоряння складається з вентилятора, який має корпус в вигляді равлика; змішувального пристрою охолоджуваною камерою згоряння, футерованою зсередини вогнетривким торкретом і тунелю для виходу продуктів згоряння. Одним з відповідальних вузлів схеми являється змішувач в якому швидкість закрученого потоку повітря складає до 100 м/с .

На рис.7.15. представлено переріз А-А.

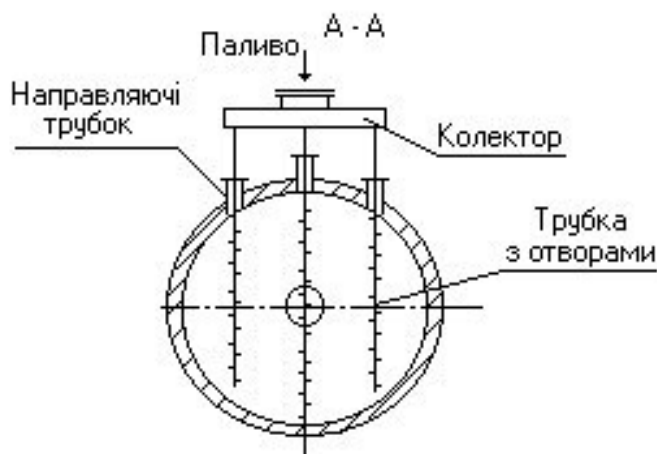


Рис. 7.15. Переріз А-А

Паливо, що подається по трубкам розпилювача, попадає в закручений потік повітря, що рухається з великою швидкістю і дуже до-



бре переміщується. Добре перемішування досягається за рахунок рівномірного розподілення газу по вільному перерізу змішувача.

Пальник розроблений В НТУУ “КПІ” і являється прототипом пристрою для термічної нейтралізації стічних вод промислових підприємств. В даному випадку в змішуючій пристрій поступають розжарені продукти згоряння, а в трубки поступають стічні води, які потім в пилоподібному стані термічно нейтралізуються. Камера згоряння в даному випадку виконує роль камери нейтралізації.

Установка виносної камери згоряння дає можливість винести процес згоряння палива за межі робочого простору, наприклад в шахтних печах, і збільшити її продуктивність, утворивши при цьому сприятливі умови для спалювання палива.

Ми розглянули лише деякі конструкції пальникових пристроїв. Окрему тему складають пристрої для їх розпалювання (запалювання горючої суміші).

Запитання для самоконтролю.

1. Яку довжину мають пальники з повним попереднім змішуванням по відношенню до внутрішнього діаметра носика пальника (калібру)?
2. Яка повинна бути довжина змішувача в інжекційних однопровідних пальниках у порівнянні з його діаметром?
3. Які заходи приймають для розширення меж працездатності інжекційного пальника у сторону зниження витрати газоподібного палива?
4. З яким коефіцієнтом надлишку повітря працюють інжекційні пальники при спалюванні природного газу?
5. З яким коефіцієнтом надлишку повітря працюють пальники з зовнішнім змішуванням компонентів горіння палива при спалюванні природного газу?
6. У яких випадках застосовують двопровідний інжекційний пальник?
7. На якій відстані необхідно розташовувати матеріал, який нагрівається, при термообробці його за допомогою панельного короткофакельного пальника?



8. Яке оптимальне значення відношень прохідних перерізів для повітря та газу при роботі пальника типу « труба в трубі » на природному газі?
9. Яка швидкість витікання продуктів згоряння (при робочих умовах) має місце в « атакуючих » пальниках?
10. Для отримання яких значень температур продуктів згоряння застосовуються пальники з накладанням на факел електричного змінного поля?
11. Яку довжину має пальник з зовнішнім змішуванням у порівнянні з внутрішнім діаметром носика пальника (калібром)?
12. Класифікація пальників.
13. Перерахуйте основні вимоги які висуваються до пальників.
14. Переваги та недоліки пальників з зовнішнім змішуванням.

7.3. Пристрої для спалювання рідкого палива (форсунки)

Пристрої для спалювання рідкого палива (*форсунки*) призначені для факельного спалювання рідкого палива. Їх завдання полягає в ретельному перемішуванні палива з повітрям і створення сприятливих умов для спалювання горючої суміші.

До форсунок висуваються такі умови.

1. Добре перемішування палива з повітрям і хороша якість розпилювання.
2. Забезпечення стабільного (стійкого) горіння факела необхідної довжини.
3. Надійність в роботі, простота конструкції, зручність в обслуговуванні, незабруднюваність, зручність чистки.

Всі форсунки можна розділити на дві групи: форсунки *низького тиску* і форсунки *високого тиску*.

В форсунках низького тиску повітря подається з допомогою вентилятора з залишковим тиском $2,94 - 8,82$ *кПа*, а в форсунках високого тиску з допомогою компресора з тиском $0,6 - 1,78$ *МПа*. В якості розпилювача може служити повітря або водяна пара.

В форсунках низького тиску все повітря, необхідне для горіння палива, проходить через форсунку. В форсунках високого тиску на розпил палива витрачається тільки $7...12\%$ (первинне повітря), а решта подається в зону горіння (вторинне повітря). якщо в якості



розпилювача являється водяна пара, то все повітря подається в якості вторинного.

Основним промисловим рідким паливом є мазут. Виходячи з того, що в форсунках високого тиску вторинне повітря не контактує з мазутними трубками, його можна попередньо підігрівати до високих температур порядку $1100 - 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а форсунки використовувати для організації високотемпературних процесів (плавильні печі, мартенівські печі).

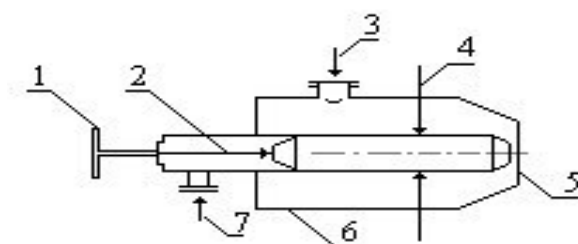
В форсунках низького тиску підігрів повітря обмежений, наприклад при спалюванні мазуту, температура попереднього підігріву повітря складає не більше $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, так як при подальшому нагріванні почнеться термічний розпад самого мазуту і прохідні перерізи при цьому зашлаковуються.

В форсунках низького тиску рідке паливо згоряє повніше, що досягається за рахунок того, що в розпилюванні приймає участь більша кількість повітря, ніж в форсунках високого тиску. Форсунки низького тиску.

Розглянемо конструкції деяких форсунок низького тиску, які отримали найбільше поширення.

Форсунка низького тиску Стальпроекту (див. рис.7.16) складається із форсункової коробки, мазутопідводячого пристрою, оснащеного голкою регулювання, і centruючих болтів. Подрібнення (розпилювання) мазуту здійснюється за рахунок великої різниці швидкостей витоку повітря і палива в вихідному перерізі форсунки. Чим більша ця різниця швидкостей, тим краща якість розпилу палива.

Тиск мазуту перед форсункою складає $49 - 98 \text{ кПа}$. Попередній підігрів повітря при роботі на мазуті обмежений $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Межі регулювання по витраті мазуту невеликі, так як зі зменшенням витрати мазуту зменшується витрата повітря, що різко погіршує якість розпилу. Максимально можна зменшити витрату мазуту до 40% від максимальної продуктивності. Довжина факела $2 - 2,5 \text{ м}$. Кут розкриття факела $20 - 30^{\circ}$, коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,2$, форсунки типізовані. Витрата мазуту $3,5 - 205 \text{ кг/год}$ при тисках повітря $2,94$ і $6,86 \text{ кПа}$ відповідно. Основна конструктивна перевага – зручність чистки мазутного отвору.



1. Маховик. 2.Голка регулювання. 3.Повітря. 4. Вісь установки центруючих болтів.
5. Носик форсунки. 6. Корпус. 7.Рідке паливо

Рис. 7.16. Схема форсунки низького тиску конструкції Стальпроєкту

Турбулентна форсунка конструкції А.Ч. Карабіна представлена на рис.7.17.

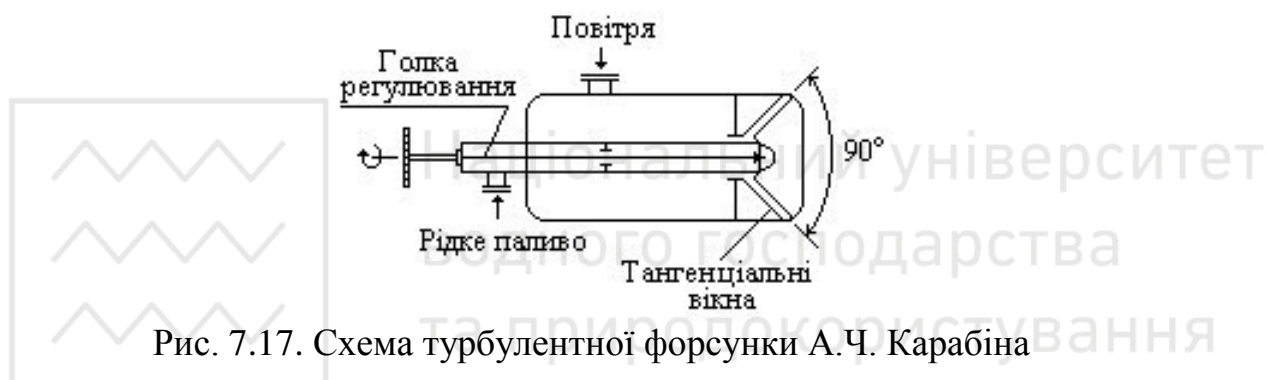


Рис. 7.17. Схема турбулентної форсунки А.Ч. Карабіна

Повітря в сопло форсунки поступає через тангенціальні вікна і закручується. Кут розкриття факела $75-90^\circ$, факел короткий – $1-1,2\text{ м}$. Витрата мазуту регулюється голкою. Основний недолік – тяжко регулювати витрату повітря.

В форсунках високого тиску якість розпилювання краща (діаметр краплі $0,05\text{ мм}$.), але повнота згоряння гірша за рахунок меншої відносної витрати повітря. Діаметр крапель в форсунках низького тиску $0,5\text{ мм}$.

Форсунки низького і високого тиску можна розділити на форсунки з середовищем розпилювання (пневмофорсунки) див. рис. 7.18. і механічні форсунки – див. рис. 7.19.

В механічних форсунках розпилювання здійснюється за рахунок енергії тиску мазуту, який витікає з отвору. Вихідний переріз отвору для мазуту в форсунках низького тиску можна визначити за такими формулами:

$$f_{\text{мазуту}} = \frac{195,625 B}{\mu_m \sqrt{P_m \cdot \rho_m}}, \quad (7.6)$$



де B – витрата мазуту, $кг/год$;

P_m – надлишковий тиск мазуту на вході в форсунку, $Па$;

ρ_m – густина мазуту, $кг/м^3$;

μ_m – коефіцієнт витрати мазуту (0,2...0,3).

$$f_{повітря} = \frac{195,625V_B}{\mu_B \sqrt{P_B \cdot \rho_B}}, \quad (7.7)$$

де V_B – витрата повітря, $м^3/год$;

P_B – напір повітря перед вихідним отвором, $Па$;

ρ_B – густина повітря, $кг/м^3$;

μ_B – коефіцієнт витрати повітря (0,7...0,8).

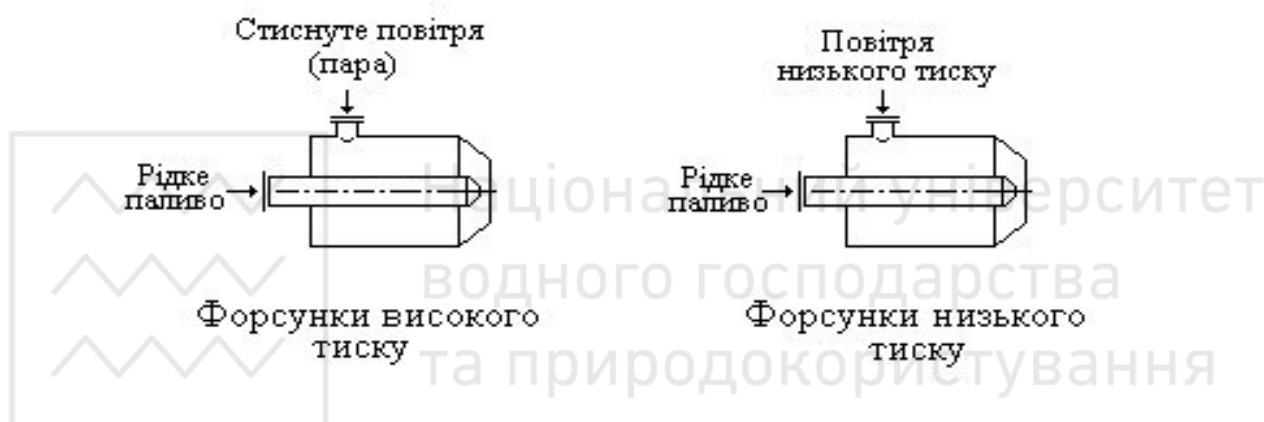
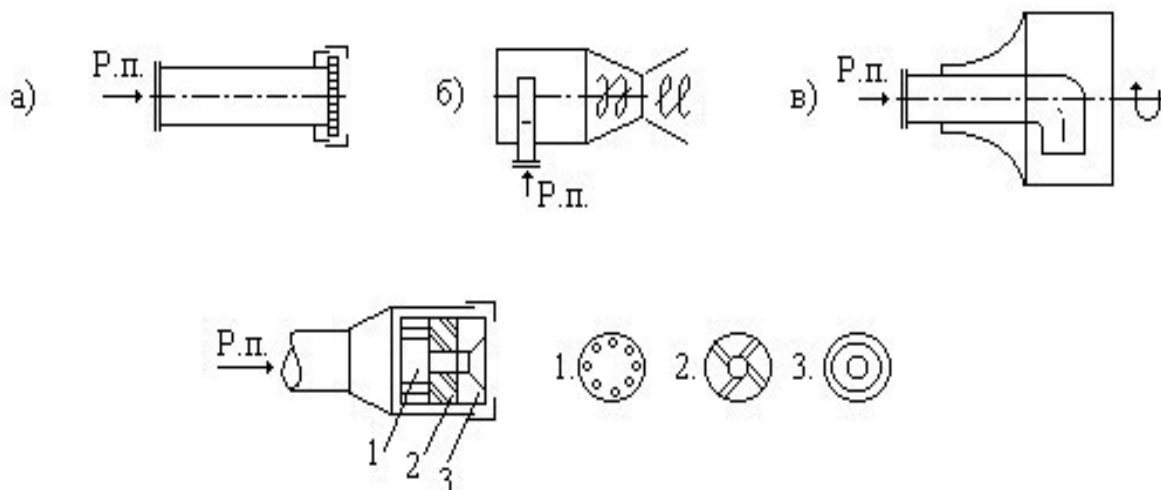


Рис. 7.18. Пневмофорсунки



а) – прямоструменеві форсунки; б) – центробіжні; в) – з обертовою чашею.
1 – розподільчий диск; 2 – завихрювач; 3 – насадка (направляючий диск).

Рис. 7.19. Схема механічної форсунки

Форсунки високого тиску.

Конструктивно форсунки високого тиску мало відрізняються один від одного. Розпилювач виходить з форсунки з великою швидкістю і подрібнює рідке паливо. На рис. 7.20. представлена форсунка високого тиску конструкції В.Г. Шухова.

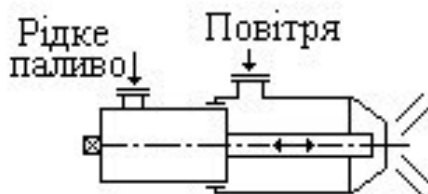


Рис. 7.20. Схема форсунки В.Г. Шухова

Прохідний переріз для виходу мазуту постійний. Величина прохідного перерізу для повітря регулюється за рахунок переміщення мазутної трубки з горизонтального напрямі. Швидкість витоку повітря (пари) порядку 300 м/с . Довжина факела у форсунок малої продуктивності $2-4 \text{ м}$, а в форсунках великої продуктивності $6-7 \text{ м}$. При роботі на парі її витрата складає $0,5-0,6 \text{ кг пари / кг палива}$. Мазут попередньо підігрівається до $110-120 \text{ }^\circ\text{C}$. Витрата повітря $0,6-0,8 \text{ кг повітря / кг палива}$. Форсунки типізовані, існує десять типорозмірів з витратами від 3 кг/год до 4 кг/год .

В деяких форсунках для збільшення швидкості витоку розпилюючого повітря використовують ефект сопла Лавалю. Наприклад, в форсунках Дніпропетровського металургійного інституту (див. рис.7.21.), де швидкості повітря або пари можуть досягати 700 м/с і більше. Продуктивність форсунок $250-2500 \text{ кг/год}$ мазуту. Надлишковий тиск повітря (пари) досягає $0,6 \text{ МПа}$.

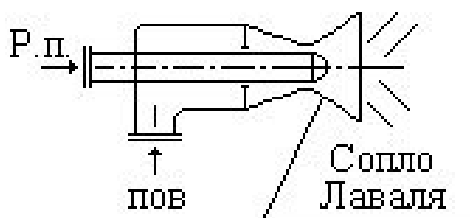


Рис. 7.21. Схема форсунки Дніпропетровського металургійного інституту
 Вторинне повітря в форсунках високого тиску можна використовувати для покращення розпилювання, як це використовується в форсунках високого тиску конструкції інституту Сталь проекту (див.рис.7.22).

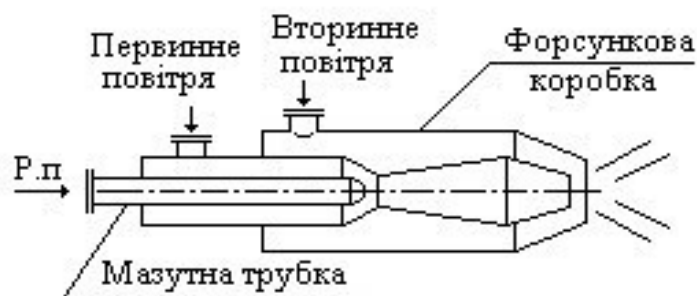


Рис. 7.22. Схема форсунки високого тиску з подвійним розпилюванням

Форсункові коробки дозволяють використовувати повітря з температурою до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, так як повітря не контактує з мазутною трубкою. Швидкість витоку повітря в вихідному перерізі форсункової коробки $20\text{--}25\text{ м/с}$ при робочих умовах. Існує цілий ряд комбінованих газо-мазутних пальників (форсунок). Іноді в виробничих умовах існує можливість одночасного спалювання газоподібного і рідкого палива, а іноді, в випадку нехватки одного виду палива, додавати друге. Схема комбінованого газо-мазутного пальника (форсунки) представлена на рис. 7.23.

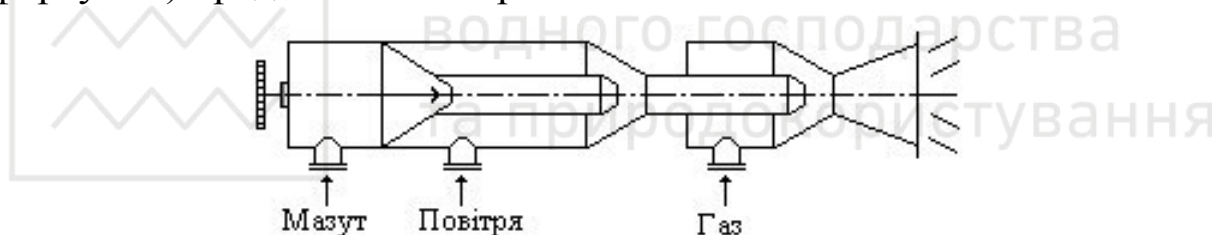


Рис. 7.23. Схема комбінованого газо-мазутного пальника (форсунки)

Пальники (форсунки) можуть використовуватися як в плавильних так і в нагрівальних печах і дозволяють одночасно спалювати за годину до 1200 кг мазуту і до 1000 м^3 природного газу. Розпилювачем може служити або стиснуте повітря з надлишковим тиском $0,45\text{ МПа}$ або природний газ, якщо дозволяє його тиск такого ж порядку. Іноді по місці можна здійснювати реконструкцію існуючих форсунок, наприклад, пневмофорсунка Карабіна може бути пристосована для одночасного спалювання природного газу і мазуту шляхом додавання проміжної газової коробки (див. рис.7.24.).

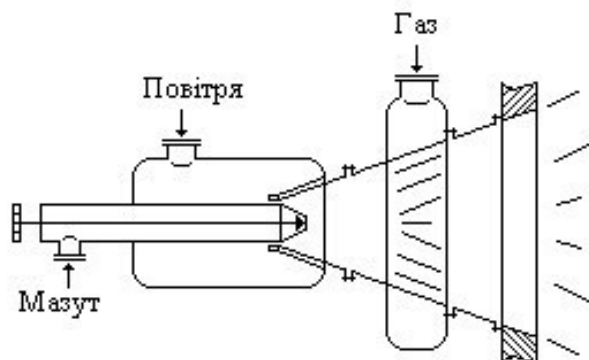


Рис. 7.24. Схема реконструкції пневмофорсунки Карабіна для спалювання мазуту і газу

Відмітимо переваги форсунок високого тиску:

1. Більш тонке розпилювання.
2. Можливість попереднього підігріву вторинного повітря до більш високих температур.
3. Більша межа регулювання продуктивності.
4. Більша продуктивність.

Поряд з перевагами існують і недоліки:

1. Підвищена витрата енергії на розпилювання рідкого палива.
2. Шум при роботі.

Радіаційні (радіантні) труби.

В тих випадках, коли необхідно захистити нагріваєму поверхню матеріалу від впливу на неї продуктів згоряння (наявність в продуктах надлишкового кисню, $\alpha > 1,0$) використовують муфелювання факела (відділення його від нагріваємого матеріала). Для цієї мети можуть служити радіаційні або радіантні труби (див. рис. 7.25.) в яких горюча суміш згоряє всередині труби. Теплота згоряння горючої суміші передається внутрішній поверхні труби, потім через стінку труби і за рахунок промененапускання (променевого теплообміну) від зовнішньої поверхні до нагріваємого матеріалу. Радіаційні труби можуть бути одногілковими без рекуператора, двогілкові і багатогілкові з рекуператором. На рис.7.25. зображена схема двогілкової радіаційної труби з рекуператором, а з правої сторони малюнка – схема поперечного перерізу рекуператора.

Матеріал внутрішньої вставки рекуператора – ковкий чавун. Матеріал труб самої радіаційної труби містить 20–25% хрому і 13–25% нікелю, і витримує при тривалій роботі температуру порядку $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє досягти температури поверхні виробів



які нагріваються $900 - 920 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Радіаційні труби широко використовуються для термообробки листової сталі. В якості паливоспалюючих пристроїв в радіаційних трубах зазвичай використовують пальники типу “труба в трубі”, в яких можна регулювати довжину факела в залежності з довжиною радіаційної труби.

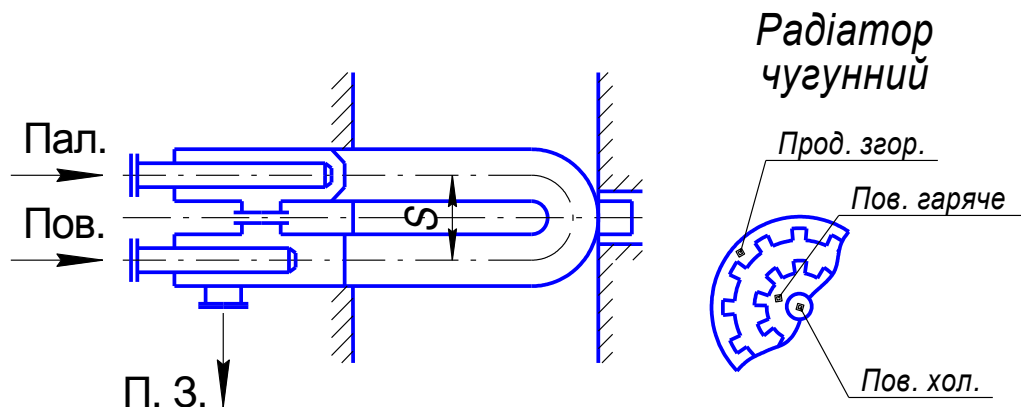


Рис. 7.25. Схема двогілкової радіаційної труби і поперечного перерізу рекуператора

Матеріал внутрішньої вставки рекуператора – ковкий чавун. Матеріал труб самої радіаційної труби містить 20–25% хрому і 13–25% нікелю, і витримує при тривалій роботі температуру порядку $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє досягти температури поверхні виробів які нагріваються $900 - 920 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Радіаційні труби широко використовуються для термообробки листової сталі. В якості паливоспалюючих пристроїв в радіаційних трубах зазвичай використовують пальники типу “труба в трубі”, в яких можна регулювати довжину факела в залежності з довжиною радіаційної труби.

Газифікатори.

Газифікатори представляють з себе пристрої, які складаються з камери згоряння, форсунки і дозволяють за рахунок часткової газифікації і рідкого палива отримати горючий газ, який легше спалити, ніж рідке паливо. Крім того, при цьому може бути мінімальне стехіометричне співвідношення компонентів горіння і менші розміри камери згоряння.

Схема газифікатора з внутрішньою газифікацією рідкого палива зображена на рис.7.26. газифікація рідкого палива досягається за рахунок форми камери згоряння, яка сприяє розпиленому рідкому паливу обертатися до його випаровування.

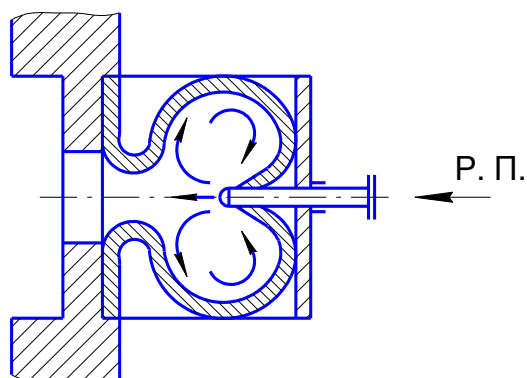


Рис. 7.26. Схема газифікатора з внутрішньою газифікацією

Існують також і інші конструкції газифікаторів, наприклад, газифікатор з внутрішньою рециркуляцією (див. рис. 7.27).

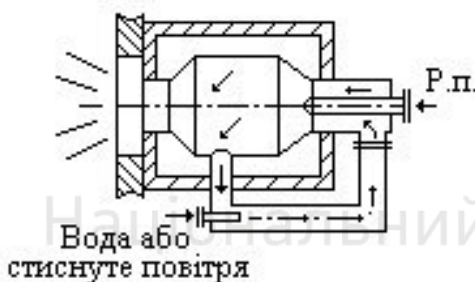


Рис. 7.27. Схема газифікатора з зовнішньою рециркуляцією

Запитання для самоконтролю.

1. Класифікація форсунок.
2. Перерайте основні вимоги які висуваються до форсунок.
3. До якої оптимальної температури можна попередньо підігрівати мазут перед подачею його у форсунку?
4. Якою буде питома витрата повітря при роботі форсунки високого тиску на рідкому паливі?
5. Назвіть основні елементи з яких складається форсунка низького тиску конструкції Стальпроекту.
6. В чому різниця між форсунками низького та високого тиску?
7. За якими залежностями визначають площу вихідного перерізу для мазуту та повітря у форсунках низького тиску?
8. Переваги та недоліки форсунок високого тиску.



Література

1. Алабовский А.Н., Анцев Б.В., Романовский С.А. Газоснабжение и очистка промышленных газов.-Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1985.-192с.
2. Бахмачевский Б. И., Зах Р. Г., Сушкин И., Н., Щукин А. А. Теплотехника.-М.: Металлургия, 1964.-595с.
3. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. Раздел Подготовка и сжигание топлива. Учебно-методический комплекс (учебное пособие). СПб.:СЗТУ, 2007.-119с.
4. Вагин А.А. Кривандин В.А., Прибытков И.А., Перлов Н.И. Топливоогнеупоры и металлургические печи. М.: Металлургия, 1978. -432с.
5. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.Л.: Госэнергоиздат, 1962. -288с.
6. Вагин А.А. Кривандин В.А., Прибытков И.А., Перлов Н.И. Топливоогнеупоры и металлургические печи. М.: Металлургия, 1978. -432с.
7. Козлов А. Л., Нуршанов В. А., Пронин В., П. и др. Природное топливо планеты.-М.: Недра, 1981.- 160 с.
8. Конторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива.-М.: Металлургиздат, 1961.-355с.
9. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи.-М.: Металлургия, 1977. -464с.
10. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание.-Л.: Недра, 1966.-327с.
11. Пашков Л.Т. Основы теории горения.-М.: МЭИ, 2002.-162с.
12. Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов А. Б. и др. Основы практической теории горения. Учебное пособие для вузов.-Л.: Энергоатомиздат, 1986.-312 с.
13. Равич М. Б. Эффективность использования топлива.- М.: Наука, 1977. – 344 с.
14. Роговой М. И., Кондаков М. Н., Сагановский М. Н. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудыванию предприятий промышленности слыхных материалов.- М.: Стройиздат, 1975.- 320 с.
15. Щукин А.А. Промышленные печи и газовое хозяйство. -М.: Энергия, 1973.-224с.
16. Чепель В.М., Щур И.А. Сжигание газов в топках котлов и печей.Обслуживание газового хозяйства предприятий.Л.: Недра, 1980. -592с.



Предметний покажчик

Даний покажчик адресує читача до тих сторінок посібника, де можна знайти відомості по суті теми рубрики і підрубрики. Числа - номери сторінок.

Якщо рубрика є сполучення прикметника і іменника, то застосований метод інверсії – іменник поставлено на перше місце, оскільки це полегшує пошук.

А

Антрацит 32

В

Вибухонебезпечність 26

Вологість безпечна 25

Волога адсорбційна 24

-гігроскопічна 24

-гідратна 24

-капілярна 24

-механічна 24

-набухання 24

Вологовміст палива 14

Вугілля 32

В'язкість 27

В'язкість умовна 27

Г

Газ водяний 35

-коксівий 34

-генераторний 35

-доменний 35

-напівкоксівий 34

-попутний 9

Газифікатори 112

Горіння 4

Горючі сланці 33

Гранулометричний склад 23

Густина газу 29

-мазуту 28



Д

Детонація 28
Діаграма I-t 66
Дрова 33

Е

Еквівалент тепловий 20

К

Кокс 8, 33
Коксування високотемпературне 8
-низькотемпературне 8
Коефіцієнт динамічної в'язкості 30
-динамічного ущільнення 25
-корисної дії топки 90
-надлишку повітря 37
-перерахунку 11
-пірометричний 56
-подріблювальної здатності 26
-тепловиділення 54
Кородуюча дія палива 26
Крекінг каталітичний 9
-термічний 9
Крекінг-мазут 20
Крекінг-газ 35
Кут природного відхилення 25
-динамічний 25
-статичний 25

М

Мазут 33
-топковий 34
-флотський 34
Маса палива горюча 10
-молекулярна 30
-органічна 10



-робоча 10

-суха 10

Механічна міцність 26

Межа займання 30

Місце скупчення 9

Н

Напівкокс 8

Напір температурний 61

Нафта 33

О

Об'ємна вага палива 25

Одорування 9

П

Паливо вологе 14

-енергетичне 5

-збагачене 5

-повітряно-сухе 25

-природне 4

-рядове 23

-сортоване 23

-сухе 14

-технологічне 5

-умовне 20

-хімічне 4

-штучне 4

-ядерне 4

Пальник 91

Приведені характеристики 20

Р

Радіаційні труби 111

Регулятор співвідношення 98

С

Сипучість палива 25



Т

Температура жаропродуктивна 50, 52

-займання 28, 30

-замерзання 26

-запалення 28

-застигання 28

-калориметрична 50

-кипіння 29

-критична 7

-плавлення золи 23

-розрахункова 50, 56

-самозаймання 28, 29

-спалаху 28

-теоретична 50, 54

Тиск парціальний 39

Теплова потужність топки 89

Теплове невантаження колосникової решітки 89

Теплове невантаження топкового об'єму 90

Теплота дисоціації 55

-згоряння палива вища 17

- згоряння палива нижча 17

Токсичність 31

Топковий пристрій 85

Торф 33

Ф

Форсунка 105



З М І С Т

Передмова	3
1. Паливо та його значення в промисловості і побуті	4
1.1 Загальні поняття та класифікація палива	4
1.2 Походження, видобування, переробка і зберігання палива	7
1.3 Способи задання складу палива	10
1.4 Теплота згоряння твердого (рідкого), газоподібного палива та її визначення	17
1.5 Приведені характеристики палива	20
2. Фізико-технічні характеристики твердого, рідкого та газоподібного палива	23
2.1 Фізико-технічні характеристики твердого палива	23
2.2 Фізико-технічні характеристики рідкого палива	27
2.3 Фізико-технічні характеристики газоподібного палива	29
2.4 Коротка характеристика та маркування окремих видів палива	32
3. Матеріальні баланси процесу повного горіння палива	37
3.1 Коефіцієнт надлишку повітря	37
3.2 Об'ємні доли продуктів згоряння палива	38
3.3 Парціальні тиски продуктів згоряння	39
3.4 Розрахунок горіння твердого (рідкого) палива	39
3.5 Розрахунок горіння газоподібного палива	44
3.6 Склад продуктів згоряння палива і кількість теплоти, яка виділяється, з врахуванням конденсації водяної пари	47
4. Температури горіння палива та визначення необхідності попереднього підігріву компонентів горіння	50
4.1 Калориметрична температура горіння палива	50
4.2 Жаропродуктивна температура горіння палива	52
4.3 Теоретична температура горіння палива	54
4.4 Розрахункова температура горіння палива	56
4.5 Температура горіння палива з врахуванням дисоціації CO₂ і H₂O, що знаходяться в продуктах згоряння палива	57
4.6 Необхідність попереднього підігріву компонентів горіння палива	61



5. Діаграма I-t повного горіння палива	66
5.1 Призначення I-t діаграми повного горіння палива	66
5.2 Послідовність побудови I-t діаграми повного горіння палива	67
5.3 Процеси які зображуються на I-t діаграмі	70
6. Неповне горіння газоподібного палива	72
6.1 Неповне горіння палива без утворення сажистого вуглецю	72
6.2 Неповне горіння палива з утворенням сажистого вуглецю	78
7. Пристрої для спалювання органічного палива	85
7.1 Топки для спалювання твердого, рідкого та газоподібного палива	85
7.2 Пристрої для спалювання газоподібного палива (пальники)	91
7.3 Пристрої для спалювання рідкого палива (форсунки)	105

Література

Предметний покажчик

Національний університет
водного господарства
та природокористування

114

115



Навчальне видання

Олександр Павлович Костюк

ПАЛИВО ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО СПАЛЮВАННЯ

Навчальний посібник

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку ???.?.2011 р. Формат 60×84¹/₁₆.

Папір друкарський №1. Гарнітура Times New Roman.

Друк трафаретний.

Ум.-друк. арк. ??. Обл.-вид. Арк.. ?,?.

Тираж ??? прим. Зам. №???

*Редакційно-видавничий центр
Національного університету
водного господарства та природокористування
33028, Рівне, вул.. Соборна, 11.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготовників і розповсю-
джувачів видавничої продукції
РВ №31 від 26.04.2005 р.*