

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Щодо виконання лабораторних робіт з
дисципліни «Теплотехніка» для студентів
спеціальності 7.090405 «Спеціальна металургія»

Київ
«ІЦ СПОВ»
2006

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Щодо виконання лабораторних робіт з
дисципліни «Теплотехніка» для студентів
спеціальності 7.090405 «Спеціальна металургія»

Затверджено
на засіданні кафедри
«Фізико-хімічні основи
технологій металів»
протокол №5/06
від 10 травня 2006р.

Київ
«ІЦ СПОВ»
2006

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теплотехніка» для студентів спеціальності 7.090405 «Спеціальна металургія» / Уклад.: М.І. Прилуцький, Д.Ф. Чернега – К.: «ІЦ СПОВ», 2006. - 68 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки

щодо виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Теплотехніка» для студентів спеціальності 7.090405
«Спеціальна металургія»

Укладачі: Прилуцький Михайло Іванович
Чернега Дмитро Федорович

Рецензент В.С. Богушевський
Відповідальний редактор К.В. Михаленков

ЗМІСТ

Вступ	
Лабораторна робота №1	5
Лабораторна робота №2	20
Лабораторна робота №3	25
Лабораторна робота №4	30
Лабораторна робота №5	34
Лабораторна робота №6	40
Лабораторна робота №7	44
Лабораторна робота №8	51
Лабораторна робота №9	61
Список літератури	68

Вступ

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності 7.090405 «Спеціальна металургія», що вивчають дисципліну «Теплотехніка».

В кожній лабораторній роботі наведені мета, основні теоретичні положення, методика розрахунку експериментальних даних.

Після ознайомлення з правилами роботи в лабораторії студент з дозволу викладача може приступити до роботи на лабораторному устаткуванні.

До початку лабораторного заняття студент повинен підготувати протокол виконання лабораторної роботи.

До виконання лабораторної роботи студент допускається тільки після здачі попередньої лабораторної роботи та перевірки викладачем його знань з теоретичних основ та методики виконання чергової лабораторної роботи. Звіт повинен мати відповідні таблиці, графіки та висновки. Звіт оформляється згідно ДСТУ 3008-95.

1. Лабораторна робота №1

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПАЛИВА

1.1. Мета роботи:

Вивчити методи визначення теплоти згорання твердого, рідкого і газоподібного палива. Поставити і провести експеримент за визначенням теплоти згорання газоподібного палива. На підставі одержаних даних дати характеристику спалюваного в калориметрі палива.

1.2. Загальні відомості про паливо:

Паливо є одним з джерел теплової енергії. Під паливом розуміють речовину, при горінні якої виділяється значна кількість тепла і яка по технічним, санітарно-гігієнічним і економічним міркуванням вигідно спалювати в промисловості, сільському господарстві, на транспорті. Паливо повинне відповідати наступним вимогам:

1.2.1. Запаси повинні бути достатніми для того, щоб їх було економічно вигідно добувати і використовувати.

1.2.2. Продукти згорання повинні легко віддалятися із зони горіння і бути нешкідливі для навколишнього органічного світу і теплових пристроїв, в яких відбувається спалювання палива.

1.2.3. Процес горіння повинен бути легко управляєм. Якість палива і поведінка його при спалюванні визначається:

хімічним складом, теплотою згорання, відношенням до нагрівання.

Основним показником економічної оцінки палива разом з іншими даними технічного аналізу є його теплота згорання.

Теплотою згорання палива називають ту кількість тепла, яка виділяється при спалюванні одиниці маси або об'єму палива до продуктів повного згорання за нормальних умов. Розрізняють вищу і нижчу теплоту згорання. Вищою теплотою згорання Q_v називається та кількість тепла, яка виділяється при спалюванні одиниці маси або об'єму палива до продуктів повного згорання (CO_2 , H_2O , SO_2) за умови, що вся волога, що утворилася при горінні, знаходиться в рідкому стані при $0^\circ C$. При конденсації і охолодженні пари 1 кг води, що утворилася при горінні, в систему повертається 2677,08 кДж тепло (прихована теплота випаровування 1 кг H_2O рівна 2268,4 кДж і теплота охолодження 1 кг H_2O від $100^\circ C$ до $0^\circ C$ рівна 418,68 кДж).

Насправді пари води конденсуються за межами нагрівального пристрою, тому поняття вищої теплоти згорання має теоретичне значення.

Під нижчою теплотою згорання Q_n^p розуміють ту кількість тепла, яка виділяється при згоранні одиниці маси або об'єму палива до продуктів повного згорання за умови, що вода, що міститься в продуктах згорання, знаходиться у вигляді пари, охолодженої до $20^\circ C$. В цьому випадку в систему 1 кг H_2O повертається кількість тепла, рівна

$$1,0 \cdot 2,0087 (373 - 293) = 160,7 \text{ кДж,}$$

де 2,0087 - теплоємність водяної пари, кДж/(кг К).

Тому різниця між Q_v і Q_n^p на 1 кг води, що міститься в продуктах горіння, рівна:

$$Q_v - Q_n^p = 2516,39 \text{ кДж /кг} \quad (1.1)$$

У продуктах горіння міститься волога, що потрапила з палива і що утворилася при спалюванні водню H^p . Тому різниця між Q_v та Q_n^p складе:

$$Q_v - Q_n^p = 25,1639(W^p + 9H^p) \text{ кДж/кг} \quad (1.2)$$

де W^p и H^p - відповідно вміст вологи і водню в робочій масі палива, %.

Теплота згорання може бути визначена двома методами: розрахунковим і експериментальним. Розрахунковий метод визначення теплоти згорання заснований на підсумовуванні теплот згорання окремих складових палива. При цьому необхідно знати хімічний склад палива і теплові ефекти горючих складових палива.

Експериментальне визначення теплоти згорання палива відбувається в калориметрах. Як теплосередовище поглинання застосовують воду, властивості якої добре вивчені. Відомі два типи калориметрів:

1.2.4. Для твердого палива та важких сортів рідкого палива.

1.2.5. Для газоподібного палива і легких сортів рідкого палива з температурою кипіння вищий $250^\circ C$.

1.3. Визначення теплоти горіння рідкого і твердого палива

1.3.1. Опис лабораторної установки

Експериментальна установка УК-2 для визначення теплоти згорання

твердого і рідкого палива складається з наступних деталей і вузлів (рис.1.1): калориметричної бомби 1; калориметричного стакану 15; оболонки калориметра 2 з укріпленою на ній мішалкою 6 і передавальним механізмом, підставки для калориметричного стакану 16; щитка панелі з електромотором, реостатом, трансформатором, контрольною лампочкою і вимикачем, метастатичного термометра (термометра Бекмана) 14; кисневого балона з манометром і редуктором, сполучних трубок і преса для брикетування.

Калориметрична оболонка 2 є масивним двохстінним з подвійним дном баком. Стінки і днище бака виготовлені з латунного листа завтовшки 1,2 мм. Поверхня зовнішнього циліндра оболонки і поверхня внутрішнього циліндра, що служить для поміщення калориметричного стакану 16, відполіровані і нікельовані з глянцем для зменшення теплообміну за допомогою випромінювання з навколишнім середовищем.

Внутрішній простір оболонки 2, утворений зовнішнім та внутрішнім циліндрами, заповнюється водою. Вода призначена для зменшення теплообміну судини з зовнішнім середовищем і оберігання від випадкових неправильних температурних змін в зовнішньому середовищі. Для наповнення оболонки водою на її верхній поверхні є спеціальний отвір, що служить також для розміщення термометра. Обода забезпечена кришкою 4, виготовленої з гетінакса. Кришка зроблена з двох половин, в місці стику їх є три отвори, призначені для метастатичного термометра, стрижня мішалки і токопідведних дротів.

На оболонці встановлені дві втулки 3, які слугують для розміщення в них стійкий 6, кронштейна 9. Кронштейн слугує для закріплення механізмів і пристосувань, що приводять в рух вертикальну мішалку 6.

Мішалка служить для перемішування води в калориметричному стакані. Мішалка одержує поступальну ходу від шатуна 11, укріпленого на ексцентриці 10, який жорстко пов'язаний з маховиком 8, Стрижень мішалки через муфту сполучений із стрижнем 7, який вільно рухається в направляючих отворах кронштейна 9 і пов'язаний з шатуном 11 за допомогою муфти 12 і закріплюючих гвинтів.

Калориметричний стакан 16 є м'яким тонкостінним металевим стаканом правильної циліндрової форми, в який наливається дистильована вода і занурюється калориметрична бомба I. Калориметричний стакан поміщається в оболонку на спеціальній підставці 16, виготовленої з теплоізоляційного матеріалу фібри і ебоніту. Підставка дозволяє створити хорошу теплоізоляцію калориметричного стакану від оболонки.

Калориметрична бомба складається із наступних частин (рис.1.2); кришки 10, затискного кільця з накладкою 7 металевого кільця 8, стакану бомби 5 і гумового кільця 6.

За допомогою цих п'яти деталей здійснюється принцип самоущільнення бомби. При підвищенні тиску в бомбі кришка 10 підіймається вгору і приминає гумове кільце 6 до металевого кільця 8 і до затискного кільця 7. Гумове кільце, деформуючись, щільно прилягає до стінок стакану і кришки бомби.

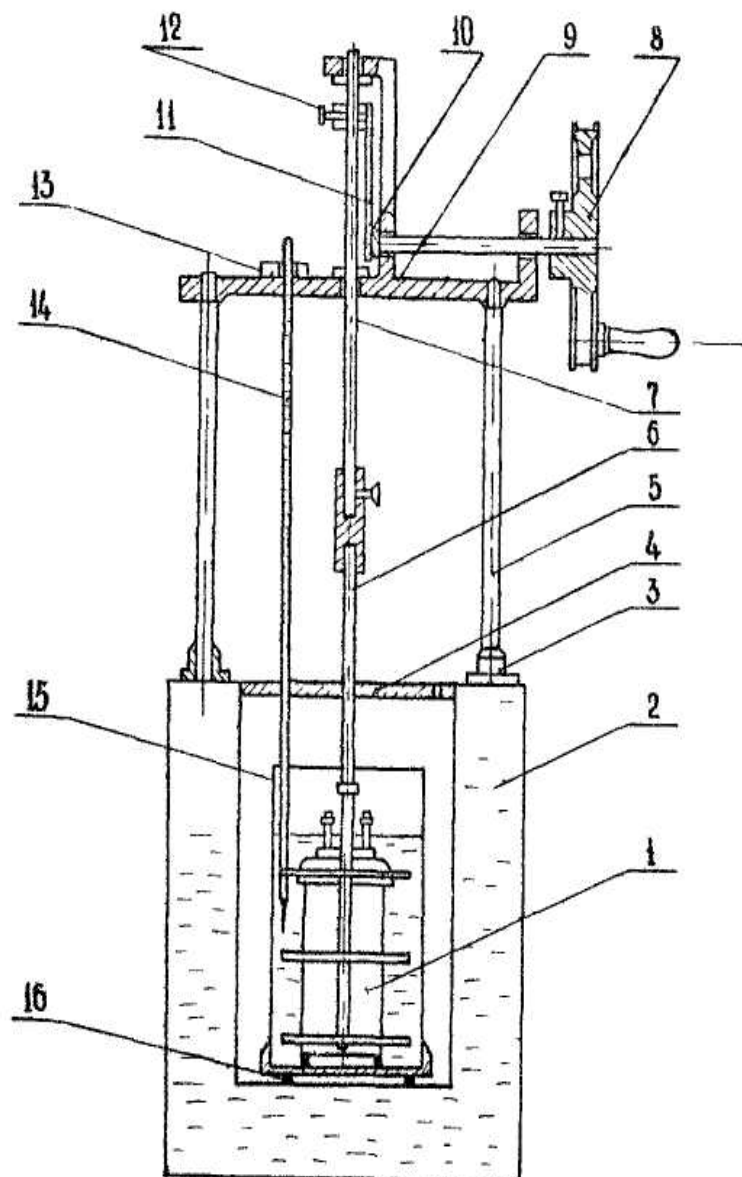


Рисунок 1.1 Схема експериментальної установки.

1 - калориметрична бомба; 2 - оболонка калориметра; 3 - втулка; 4 - кришка; 5 - стійка; 6 - мішалка; 7 - стрижень; 8 - маховик; 9 - кронштейн; 10 - ексцентрик; 11 - шатун; 12 - муфта; 13 - затиск; 14 - метастатичний термометр; 15 - калориметричний стакан; 16 - підставка.

Вхідний клапан 14, слугує для наповнення бомби киснем заснований також на принципі самоущільнення. Накопичення досягається натисненням клапана 4, з укріпленою в ній хлорвініловою прокладною, за рахунок тиску кисню в бомбі на заточуваний кінець корпусу штуцера вхідного клапана 11. Пружина 10 слугує для надання клапану 4 вертикального напрямку і закріплення його при встановленні рівності тиску в бомбі і в системі кисневого манометра.

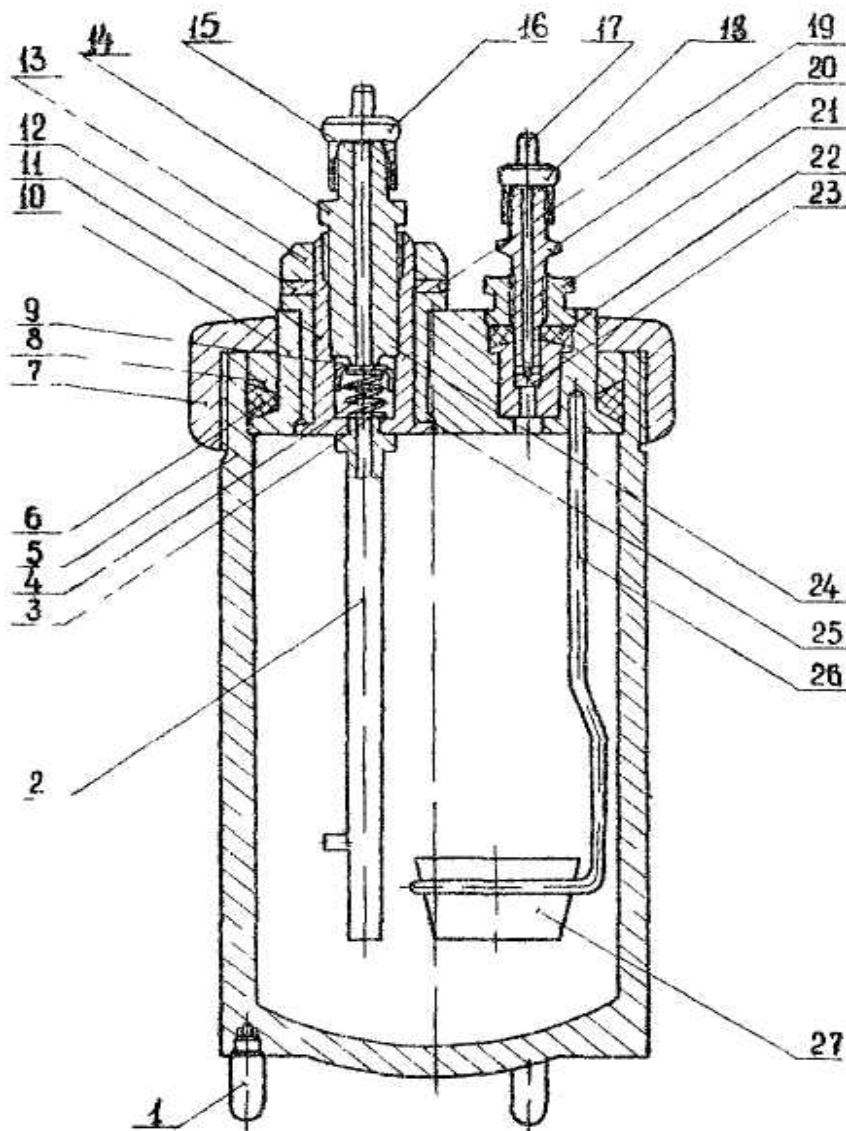


Рисунок 1.2 Калориметрична бомба

1 - стійка, 2 - вхідна трубка, 3 - пружина, 4 - клапан з прокладкою, 5 - стакан бомби, 6 - гумове кільце, 7 - затискне кільце, 8 - металеве кільце, 9 - циліндровий клапан, 10 - кришка бомби, 11 - корпус штуцера вхідного клапана, 12 - шайба, 13 - гайка, 14 - вхідний клапан, 15 і 17 - хлорвінілові прокладки, 16 і 18 - знімні ковпачки, 19 - ебонітова прокладка, 20 - вихідний клапан, 21 - сальникова щітка, 22 - поліхлорвініловий сальник, 23 - сідло, 24 алюмінієва прокладка, 25-ебонітовий ізолятор, 26-токоведущий штифт, 27 - чашка.

Для створення герметизації в порожнині клапана 4 застосовується алюмінієва прокладка 24. Зверху вхідний клапан закривається знімним ковпачком 16 з хлорвініловою прокладкою 15. Внизу вхідний клапан закривається трубкою 2, яка служить для наповнення бомби киснем. Вхідний клапан 14 разом з трубкою 2 є в той же час одним з електроконтактів бомби.

Для оберігання ебонітового ізолятора 25 від дії гарячих газів кільцева

щілина між корпусом клапана і кришкою заповнюється вогнетривкою електроізоляційною мастикою складається з жовтого окислу свинцю (90%) і гліцерину (10%) або фосфатоцементу.

Вихідний клапан 20, також розміщений в кришці бомби, є звичним голчатим запірним вентилям. Він закривається ковпачком 18 з поліхлорвінілової прокладкою 17.

Ковпачки 16 і 18 одночасно служать штифтами для приєднання дротів, що підводять ток для запалення палива.

Токопідводний штифт 26 з кільцем для утримування калориметричної чашки 27 вгвинчений безпосередньо в кришку бомби 10. Бомба стоїть на стійках I, виготовлених: окремо від стакана бомби 6 і укріпленим в ній.

Електричний щит призначений для подачі тока, що живить мотор, що приводить в рух мішалку і для накала проволони, від якої походить запалюється паливо. На електричному щитку розміщені електромотор, що приводить в рух мішалку; ползунковий реостат, слугуючий для регулювання числа оборотів двигуна; трансформатор, що перетворює струм напругою 220 В на 6 В.

2.3.2. Порядок виконання роботи і проведення розрахунків

Теплота згорання твердого палива визначається спалюванням приблизно 1 г твердого палива в калориметричній бомбі в середовищі кисню. На навішування твердого палива виготовляють на гвинтовій хрінниці брикет, з впресованою в нього заздалегідь зваженою мідною дротиною діаметром 0,2 мм і завдовжки 120 мм. Одержаний брикет ретельно очищають від пилу. Брикет зважують на аналітичних вагах з точністю до четвертого знаку. Чашка 27 для зважування (рис.1.2) прожарюється і охолоджується. Зважений брикет підвішують над чашкою 27, укріплюючи його за два кінчики мідного зволікання до вхідної труби 2 і токоведущему штифту 26 (рис.1.2).

У калориметричну судину наливають дистильовану воду до рівня, щоб вона покрила бомбу до знімних ковпачків 16 і 18 клапанів (рис.1.2). Потім бомбу виймають з калориметричної судини. Судина витирається досуха зовні. Судину ставлять на підставку 16 в оболонку калориметра (рис.1.1).

У чистий сухий стакан бомби 5 (рис.1.2) наливають піпеткою 10 мл дистильованої води. Вода призначена для розчинення виникаючих при спалюванні складових палива оксидів сірки і азоту.

Кришку 10 з надітими на неї гумовими 6 та металевим 8 кільцями поволі занурюють до упору в стакан бомби 5 (рис.1.2) Потім на стакан надягають затискне кільце 7 і загвинчують його ручкою повністю.

Після цього приступають до наповнення бомби киснем. Для цього відкривають вихідний клапан 20 і приєднують манометричну кисневу трубку, що йде від манометра до вхідного клапану Відкривають кран кисневого балона і заповнюють бомбу киснем. Для витіснення киснем повітря з бомби вихідний клапан залишають відкритим на 2 хвилини. Потім закривають вихідний клапан і бомба заповнюється киснем. Коли тиску в бомбі досягне 25-30 кг/см²,

закривають кран кисневого балона, від'єднують кисневу трубку від бомби, на вхідний та вихідний клапани бомби надягають знімні ковпачки 16 і 18.

Бомбу токоведущими дротами під'єднують до електричного щиту. Потім встановлюють мішалку і перевіряють її обертання від руки за ручку маховика, щоб вона не торкалася поверхні бомби. Бомбу і мішалку слід встановлювати так, щоб при встановленні термометра останній не торкався ні бомби, ні мішалки, ні стінок судини.

За допомогою затиску 13 укріплюють метастатичний термометр 14 (рис.1.1) для вимірювання температури води під час досвіду. Термометр настроюють так, щоб ртуть на шкалі стояла в інтервалі $0 \pm 2\text{C}^0$. Після встановлення термометра калориметр закривають кришкою і повторно перевіряють рух мішалки обертанням маховика від руки. Тільки переконавшись, що мішалка працює добре, включають струм. При правильному включенні мішалка починає працювати. Для вирівнювання температури окремих частин установки воду в калориметрі перемішують мішалкою протягом 10-15 хвилин. Потім приступають до проведення досвіду.

Дослід розділяють на три періоди: початковий, головний і кінцевий.

Початковий період передуює запаленню брикету і служить для вивчення вимірювання температури установки унаслідок теплообміну з навколишнім середовищем. Вимір температури проводиться а течія 5 хвилин через кожну хвилину: T_1 ; T_2 ; T_3 ; T_4 ; T_5 . Якщо температура частин установки ще не вирівнялась, то проведені вимірювання температури початкового періоду не беруться до уваги і починають вимірювання знову.

Після останнього вимірювання температури початкового періоду запалюють брикет, для чого натискають на кнопку "Запалення".

Запаленням брикету починається головний період досвіду, протягом якого відбувається згорання брикету, передача тепла, брикету, що виділяється при горінні, калориметру і вирівнювання температури всіх частин установки.

На початку головного періоду температура підвищується дуже швидко, потім повільніше і, нарешті, починає падати. Закінчення головного періоду помічається по рівному падінню температури. Тривалість головного періоду звичайне 6-9 хв. Виміри температури в головному періоді проводяться через кожні півхвилини (T_6 - T_{17} , при тривалості періоду 6 хвилин).

Після закінчення головного періоду проводять спостереження вимірювання температури ще протягом 5 хвилин - це кінцевий період досвіду (T_{18} - T_{23}). Кінцевий період служить для тих же цілей, що і початковий, тобто для спостереження і обліку теплообміну установки з навколишнім середовищем, але в умовах кінцевої температури досвіду.

Після закінчення кінцевого періоду вимикається струм. Від бомби від'єднують токопідведні дроти і її виймають з калориметричної судини. Шляхом вигвинчування випускного штуцера поволі стравлюється кисень, що залишився, потім відкривають кришку бомби. Перевіряють повноту згорання брикету і виміряють довжину мідної проволочки, що залишилася.

У калориметричній бомбі вуглець окислюється до CO_2 , водень до H_2O ,

сірка до SO_2 , яка розчиняючись у воді утворює сірчану кислоту H_2SO_4 . Азот, що виділився, з палива окислюється до окислу азоту NO_2 , який, реагуючи з водою, дає азотну кислоту. Тому при обчисленні теплоти згорання палива за наслідками досліду необхідно враховувати поправку на "кислотоутворення", тобто поправку на теплоту утворення і розчинення кислот.

Визначення кількості утворившихся азотної і сірчаної кислот проводять об'ємним методом. Для визначення кількості азотної і сірчаної кислот, що утворилися, ретельно обмивають всі внутрішні частини бомби і розчин зливають в стакан. Стакан покривають склом, нагрівають на електроплитці до кипіння і кип'ятять 4-5 хв. для видалення вугільної кислоти. Охолодивши стакан додають дві краплі розчину фенолфталеїну і титрують 0,2 нормального розчину сірчаного барію $\text{Ba}(\text{OH})_2$, до появи незникаючого протягом однієї хвилини рожевого забарвлення. При цьому отітровується як азотна, так і сірчана кислота. Потім до розчину додають 20 мл 0,1 нормального розчину соди для переводу азотнокислого барію, що утворився при першому титруванні, в нерозчинний вуглекислий барій, нагрівають до кипіння і кип'ятять 4-5 хвилин. Після охолодження переводять вміст стакана разом з осадом в мірну колбу місткістю 250 мл і розбавляють до мітки дистильованої води. Збовтавши розчин, фільтрують його через сухий щільний фільтр в мірну колбу на 200 мл, виливають в стакан, додають 2 краплі розчину метілоранжа і отітровують надлишок соди 0,1 нормальної соляної кислоти HCl появи рожевого забарвлення.

Вища теплота згорання палива Q_B визначається по формулі 1.3:

$$Q_B = \frac{B \cdot \Delta t - Q_{\text{пр}} - Q_{\text{кис}}}{a} \quad (1.3)$$

де B - водяний еквівалент калориметра з водою й калориметричною бомбою (водяне число калориметра), Дж/град;

$Q_{\text{пр}}$ - теплота, виділювана при згорянні дроту, Дж;

$Q_{\text{кис}}$ - теплота, виділювана при утворенні й розчиненні кислот, Дж;

Δt - зміна температури в головному періоді досліду з урахуванням виправлення на радіацію;

a - маса брикету, г.

Водяне число калориметра визначається дослідним шляхом аналогічно визначенню теплоти згорання твердого палива. Для цього брикет виготовляють із бензойної кислоти, для якої відома теплота згорання - 26477,3 Дж/г і по формулі (2.3) розраховують водяне число B .

Зміна температури наприкінці головного періоду T_{17} , з урахуванням виправлення на радіацію визначається з вираження:

$$\Delta t = T_{17} - T_5 + b \quad (1.4)$$

де T_5 - температура на початку головного періоду;

b - виправлення на радіацію, що обчислює по формулі професора Щукарева А.Н. :

$$\delta = n \cdot m + \frac{m_1 - m}{2} (2 - z) \quad (1.5)$$

де m - зміна температури за півхвилини в початковому періоді:

$$m = \frac{T_0 - T_5}{10} \quad (1.6)$$

m_1 - зміна температури за півхвилини в кінцевому періоді:

$$m_1 = \frac{T_{17} - T_{22}}{10} \quad (1.7)$$

n - кількість півхвилин головного періоду,

z - кількість півхвилин швидкого підйому температури (більше $1/6^\circ$ за півхвилини).

Кількість теплоти, виділювана при згорянні мідної дротини $q_{\text{пр}}$ визначається з вираження:

$$q_{\text{пр}} = 2512 \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \rho}{4} \quad (1.8)$$

де 2512 - теплота згорання для мідної дротини, Дж/г;

ρ - щільність міді, г/см³; $\rho = 8,95$ г/см³

Кількість теплоти, виділювана при утворенні й розчиненні азотної й сірної кислот $q_{\text{кис}}$ визначаються з вираження:

$$q_{\text{кис}} = 5,98 U - 94,2 S \quad (1.9)$$

де U - кількість мілілітрів децинормального розчину

$\text{Ba}(\text{OH})_2$, витраченого на титрування азотної кислоти, що утворилася, мл;

5,98 - теплота, виділювана одним мілімолем кислоти, Дж;

94,2 - теплота, виділювана на 1% сірки, що є в паливі, Дж;

S - відсоток сірки, що окислилася в сірчану кислоту, %.

Визначення кількості мілілітрів децинормального розчину $\text{Ba}(\text{OH})_2$ і змісту сірки у відсотках визначається в такий спосіб. Нехай на титрування розчину з бомби пішло $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 16,35 мл. Додане розчину Na_2CO_3 18,65 мол. На зворотне титрування 4/5 (200 мл) розчину пішло HCl 10,3 мол. Тому відтитровано надлишок Na_2CO_3 $10,3 \cdot 5/4 = 12,9$ мл. пішло на титрування HNO_3 $18,65 - 12,9 = 5,76$ мол, тобто на титрування всієї кислоти витрачено 16,35 мл 0,1 нормального розчину $\text{Ba}(\text{OH})_2$, з них пішло на титрування HNO_3 5,75 мол. Пішло на титрування H_2SO_4 лугу $16,35 - 5,75 = 10,6$ мл. 1 мл 0,1 нормального розчину H_2SO_4 містить 0,165% сірки. Тоді зміст сірки в паливі складе $0,165 \times 10,6 = 1,75\%$.

1.3.3. Визначення теплоти згорання мазуту. Послідовність проведення досліду й розрахунок теплоти згорання мазуту аналогічні визначенню теплоти згорання твердого палива. Різниця полягає в готуванні навішення проби. При

цьому мазут наливають у попередньо прожарену й зважену чашечку й зважують у ній. Потім виміряють довжину мідного дротика. Збирають бомбу й проводять дослід.

1.4. Визначення теплоти згоряння газоподібного палива

Визначення теплоти згоряння газоподібного палива виробляється за допомогою калориметра, дія якого заснована на поглинанні безупинно, що протікає потоком води всієї кількості тепла, що виділяється при згорянні безперервного струменя випробуваного газу.

Теплота згоряння визначається по формулі:

$$Q = \frac{c \cdot W \cdot (t_k - t_n)}{V_0} \quad \text{Дж/дм}^3 \quad (1.10)$$

де c - теплоємність води, Дж/(г*град);

W - кількість нагрітої води, м;

t_n - початкова температура води (холодної), °С;

t_k - кінцева температура води (нагрітої), °С;

V_0 - кількість спаленого газу, дм³.

В умовах досвіду температура навколишнього середовища не дорівнює 0°С, а тиск відрізняється від нормального, тому об'єм газу приводять до нормальних умов:

$$V_0 = V \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P}{101,3} \quad (1.11)$$

де t - температура спалюваного газу, °С;

P - тиск газу в умовах досвіду, кН/м.

$$P = P_0 + h \quad (1.12)$$

де P_0 - барометричний тиск повітря, кН/м²;

h - манометричний тиск газу, кН/м².

Тому що за допомогою калориметра визначається нижча теплота згоряння газоподібного палива, то потрібно ввести виправлення на теплоту конденсації водяного пару, що втримується в продуктах згоряння. З урахуванням всіх виправлень формула для визначення нижчої теплоти згоряння Q_n^p Q має такий вигляд:

$$Q_n^p = \frac{c \cdot W \cdot (t_k - t_n) - 2512W}{V} \cdot \frac{273 + t}{273} \cdot \frac{101,3}{P} \quad (1.13)$$

де 2512 Дж/г - теплота конденсації 1 г водяної пари;

W - кількість конденсату, мл.

1.4.1. Опис лабораторної установки

Установка для визначення теплоти згоряння газоподібного палива складається з газового годинника 1, стабілізатора тиску 2, пальника 4, мірного

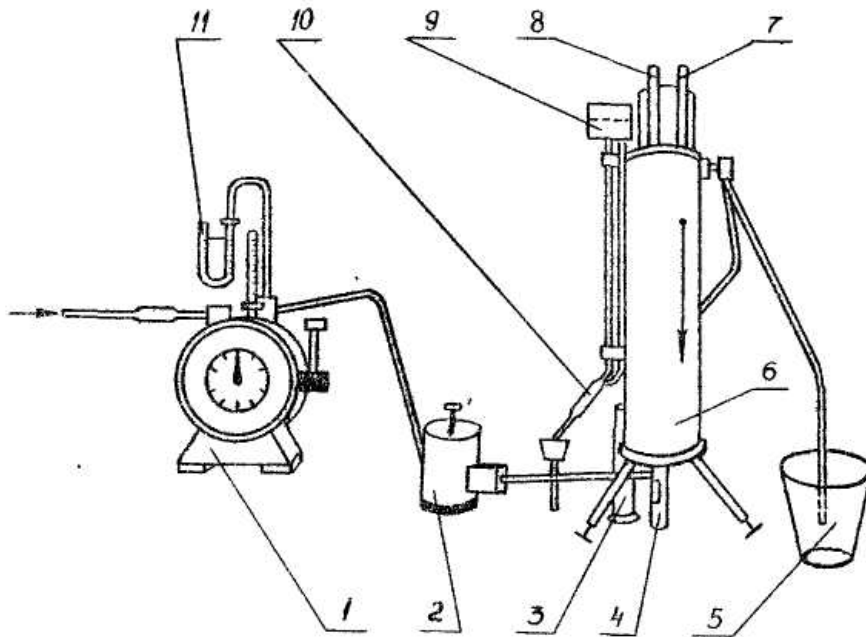


Рисунок 1.3 Установа для визначення теплоти згоряння газоподібного палива: 1 - газовий годинник, 2 - стабілізатор тиску, 3 - мензурка, 4 - газовий пальник, 5 - мірне цебро, 6 - калориметр, 7,8 - термометри, 9 - напірний бак, 10 - зливальний пристрій

відра 5, калориметра 6 (рис.1.3).

Проточний калориметр складається з металевих циліндрів 34 й 33, вставлених один в іншій (рис.1.4). Весь калориметр укладений у кожух 35. Внутрішній циліндр 33 не має дна й служить камерою згоряння досліджуваного газу, що спалюють за допомогою пальника 17. Продукти згоряння піднімаються нагору, потім опускаються по трубах 7, збираються в камері 20 і через патрубок 21 виходять назовні. У патрубку 21 поміщена заслінка 22 з рукояткою для регулювання швидкості руху продуктів згоряння. Температуру продуктів згоряння $t_{\text{п}}$ вимірюють термометром 26.

Вода надходить із водопроводу в напірний бак 2, потім по трубці 3 - у калориметр. Кількість подаваної в калориметр води регулюється вентилем 4. Надлишок води надходить у секцію напірного бачка 36 і по трубці 16 зливається в каналізацію.

Входячи в калориметр, вода омиває термометр 5, що відзначає її початкову температуру $t_{\text{н}}$, далі по трубці 7 надходить у камеру 17, проходить між трубами 6 і нагрівається за рахунок тепла продуктів згоряння.

Нагріта вода попадає в камеру для змішання 8, омиває термометр 24, що показує температуру нагрітої води $t_{\text{к}}$, і по трубці 10 попадає в посудину II. Переливаючись через верх лійки 37, вода стікає по трубці 12 і через кран 13 направляється в каналізацію або мірне ведро для виміру.

Трубка 26 служить для стоку конденсату, що утвориться при остиганні пару продуктів згоряння.

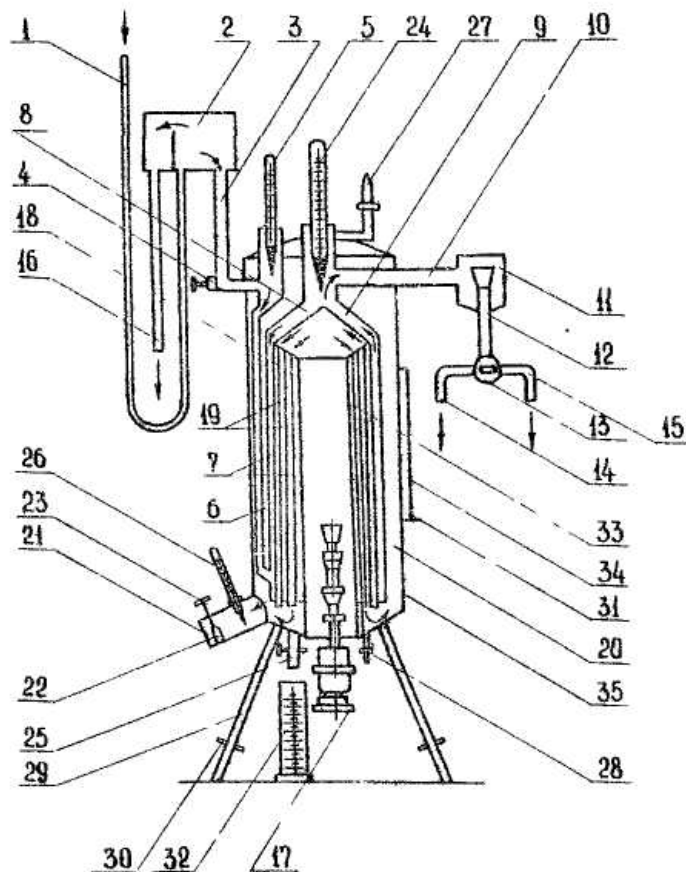


Рисунок 1.4 Калориметр КЛП-1:

1 - трубка для подачі води, 2 - напірний бачок, 3 - трубка, 4 - регулюючий вентиль, 5 - термометр, 6,7 - трубки для руху води, 8 - камера змішання, 9 - горловина, 10 -відвідна трубка, 11 - посудина, 12 - трубка для стоку, 13 - кран, 14,15 - зливальні трубки, 16 - трубка для зливу, 17 - пальник, 18 - топковий простір, 19 - трубка для руху продуктів горіння, 20 - камера, 21 - патрубок, 22 - заслінка, 23 - рукоятка, 24 - термометр, 25 - трубка для стоку конденсатора, 26 - термометр, 27 - трубка для випуску повітря, 28 - трубка для зливу води, 29 - ніжки, 30 - настановний гвинт, 31 - контроль рівня води, 32 - мензурка, 33 - внутрішній циліндр, 34 - зовнішній циліндр, 35 - кожух, 36 - напірний бак, 37 - лійка.

По трубці 27 з калориметра віддаляється повітря. Калориметр установлений на трьох ніжках 29, з настановними гвинтами 30, для додання йому вертикального положення.

Газовий годинник складаються з барабана, укладеного в кожух 8 (рис. 1.5). Внутрішній простір барабана розділений перегородками на чотири камери. На поверхні барабана під кожною камерою зроблені отвори, цими отворами камери зднюються із простором між кожухом і стінками барабана. Крім того, кожна камера зднюються за допомогою отворів із внутрішньою циліндричною камерою. Кожух за допомогою отвору 9 наповнюється водою до певного рівня, що регулюється водомірним пристроєм 1.

Газ підводять через штуцер 2 і надходить у ту з камер, отвір якої перебуває

над водою. Внаслідок тиску газу на стінки камери барабан повертається по годинній стрілці. При повороті барабана з-під води виходить отвір, що з'єднує камеру із простором між стінками барабана й кожуха. Через цей отвір газ виходить із камери й далі через штуцер 3 направляється до виходу. Потім ця камера заповнюється водою, а газ надходить через наступну. При одному обороті барабана через годинники проходить об'єм газу, дорівнює об'єму чотирьох камер. Цей об'єм дорівнює 5 хвилинам. Обертання барабана передається стрілці, що рухається по циферблаті. Для нормальної роботи годинник повинні бути встановлені в строго горизонтальному положенні за рівнем. Температура газу заміряться термометром, установленим в одне з отворів 4. Тиск газу заміряться U-образним манометром.

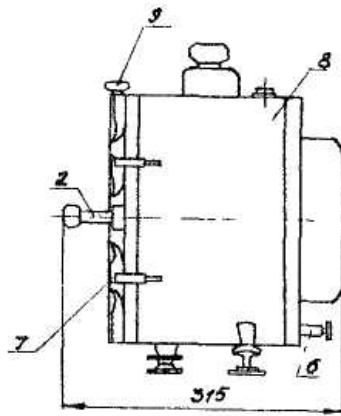


Рисунок 1.5 Загальний вид газового годинника:

1 - водомірний пристрій; 2 - штуцер для входу газу, 3 - штуцер для виходу газу, 4 - отвору: одна для приєднання U-образного манометра, друге для установки термометра, що вимірює температуру газу, 5 - отвір для установки термометра, що показує температуру води в лічильнику, 6 - кран для спуску води, 7 - затиски, 8 - кожух газових годин, 9 - отвір для заливання води.

1.4.2. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

Калориметр наповнюють водою, для чого відкривають водопровідний кран, а регулюючий вентиль 4 установлюють у такому положенні, щоб із трубки 16 вода вилілася безперервним тонким струменем (рис.1.4).

При незапаленому пальнику пропускають через внутрішній циліндр 33 установки 20 дм³ газу, щоб витиснути повітря (інакше можливе вибух). Потім пальник запалюють і регулюють потік повітря в неї таким чином, щоб полум'я пальника не було світящимся і до досягало висоту близько 5 см. Запалений пальник установлюють у внутрішній циліндр 33, який слугує камерою згоряння. Для спостереження за процесом горіння газу під пальник кладуть дзеркало.

Кількість расходу води й газу регулюють таким чином, щоб температура вихідної води була на 10-12° вище температури вхідної води, а

температура газів, що відходять, була як можливо ближче до кімнатної температури. За таких умов витримують калориметр 5-6 хвилин, а потім приступають до виконання досліду.

Таблиця 1.1

Психометрична таблиця:

Показання вологого термометра, °C	Різниця показань сухого і вологого термометрів																
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3	-
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	16	11	7	-
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	35	31	26	23	18	14	10	-
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20	16	14
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	22
8	100	92	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37	33	30	27	25
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34	31	28
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36	33	30
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32
13	100	94	88	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	39	36
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43	41	37
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	40
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53	50	47	45	42
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49	47	44

По психрометру визначають температуру сухого й вологого термометрів, а потім по табл. 1.1 визначають вологість повітря. Потім визначають атмосферний тиск і температуру в приміщенні лабораторії, температуру й тиск природного газу.

Дослід починають після досягнення максимальної температури води, що виходить із калориметра.

У момент, коли стрілка газового годинника доходить до 0, швидко перекидають трубку 14 у мірне ведро, а під трубку 25 ставлять мірний циліндр для збору конденсату (рис. 1.4) через кожні півоберта стрілки газового годинника записують температуру вхідної й вихідної води й температуру газів, що відходять. Дослід закінчують після спалювання 20 дм³ газу (6 обертів стрілки газового годинника).

Для цього в момент наближення стрілки годин до нуля бістро винімають циліндр із конденсатом і трубку 14 з мідного ведра. Потім виміряють кількість конденсату W_c і нагрітої води W . Дані досвіду заносять у журнал і по формулі (1.13) обчислюють нижчу теплоту згоряння Q_H^p

Журнал досліду:

Температура сухого термометра, t_c

Температура вологого термометра, t_b

Вологість повітря, ω

Атмосферний тиск, P_6

Манометричний тиск газу, h

Температура вхідної (холодної)

води в калориметр, t_n

Температура вихідної (гарячої)

води з калориметра, t_k

Температура газу, t

Температура вихідних продуктів згоряння з калориметра, $t_{п}$

Кількість спаленого газу, V

Кількість нагрітої води, W

Кількість конденсату, W_1

Температура в приміщенні лабораторії, $t_{л}$

Дослідами встановлено, що відношення об'єму повітря, необхідного для згоряння газу у калориметрі, до об'єму газу приблизно дорівнює 7, а відношення об'єму продуктів згоряння до об'єму газу - 7,6. По табл. 1.2 знаходимо зміст насиченої водяної пари, при даній температурі t_n в 1 м³ повітря. Потім по формулі (1.14) визначаємо масу насичених водяних парів, що надходять із повітрям на спалювання 1 м³ газу:

$$M_1 = \rho \cdot \omega \cdot 7 \text{ г/м}^3 \quad (1.14)$$

де ω - відносна вологість повітря.

По формулі (1.15), користуючись таблицею 1.2, визначаємо масу водяної пари g_1 , яка виноситься продуктами згоряння з калориметра при температурі $t_{п}$:

$$M_2 = 7,6 \cdot g_2 \text{ г/м}^3, \quad (1.15)$$

Тоді кількість водяного пару, одержуваного при спалюванні газу, буде дорівнювати:

$$M = M_2 - M_1 = 7,6 \cdot g_2 - 7 \cdot g_1 \cdot \omega \text{ г/м}^3 \quad (1.16)$$

Тоді вища теплота згоряння газу буде дорівнювати:

$$Q_B^p = Q_H^p + 2512 \cdot M \text{ Дж/дм}^3 \quad (1.17)$$

Кількість водяного пару M у формулу (1.17) необхідно підставляти в г/дм^3 .

Таблица 1.2 Вміст насиченої водяної пари в 1 м^3 повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$g, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$g, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$g, \text{г/м}^3$
6	7,09	16	13,66	26	24,4
7	7,59	17	14,50	27	25,6
8	8,13	18	15,4	28	27,2
9	8,62	19	16,3	29	28,7
10	9,40	20	17,3	30	30,4
11	10,08	21	18,3	31	32,0
12	10,67	22	19,4	32	33,8
13	11,38	23	20,6	33	35,7
14	12,05	24	21,8	34	37,6
15	12,83	25	23,0	35	39,6

2. Лабораторна робота № 2 ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ ГАЗА ПРИ ЙОГО РУСІ В ГАЗОПРОВІДІ

2.1. Мета роботи

Дослідити втрати енергії газу при його русі на різних ділянках трубопроводу; обчислити швидкість і витрату газу, коефіцієнти місцевих опорів, коефіцієнт тертя на прямолінійній ділянці, коефіцієнт корисної дії дифузора.

2.2. Загальні відомості

Рух газів у печах й їхніх елементах визначає умови спалювання палива, передачу тепла нагріваемому матеріалу, видалення продуктів згоряння. У ряді випадків від характеру руху газів залежить протікання технологічних процесів.

Рух газів по трубах і каналах печей супроводжується втратою напору, обумовленої витратами енергії на подолання газодинамічних опорів. По своїй природі газодинамічні опори підрозділяються на опори тертя й місцеві опори. Опорами можуть бути також зустрічні геометричні напори, що виникають при

змушеному опусканні потоку гарячих газів.

Величина втрат напору на подолання опору сил тертя $h_{тр}$ по всій довжині трубопроводу й каналів залежить від характеру руху газу й стану поверхні стінок:

$$h_{тр} = \delta_{тр} \cdot \frac{l}{d_{пр}} \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho_0}{2} (1 + \beta t) = \delta_{тр} \cdot \frac{l}{d_{пр}} \cdot \frac{W \cdot \rho}{2} \quad (2.1)$$

де $\delta_{тр}$ - коефіцієнт тертя;

l - довжина ділянки трубопроводу або каналу, для якого визначається втрата напору, м;

W_0 - швидкість газу, зведена до нормальних умов, м/с;

W - швидкість газу при температурі t , м/с;

ρ_0 - щільність газу при нормальних умовах, кг/м³;

ρ - щільність газу при температурі t , кг/м³;

$\beta = 1/273$ - коефіцієнт об'ємного розширення газу, 1/°C;

t - температура газу, °C;

$d_{пр} = \frac{4F}{P}$ - приведений діаметр трубопроводу або каналу, м;

F - площа поперечного перерізу трубопроводу або каналу, м²;

P - периметр перетину трубопроводу або каналу, м.

Коефіцієнт тертя $\delta_{тр}$ у загальному випадку залежить від фізичних властивостей потоку газу, умов його руху та стану поверхні стінок. Практично в нагрівальних пристроях значення коефіцієнта тертя коливається в межах від 0,01 до 0,1.

Режим руху газів характеризується величиною критерію Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{W \cdot d_{пр}}{\nu} \quad (2.2)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної вязкості при t м²/с;

Значення коефіцієнта кінематичної вязкості газу відомої сполуки в залежності від його температури визначається по табличним даним, що допускає лінійну інтерполяцію.

$$\nu = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\nu_i}} \quad (2.3)$$

де V_i - об'ємний зміст у газі компонента i , %;

ν_i - коефіцієнт кінематичної вязкості i -го компонента при температурі t , м²/с.

При ламінарному режимі руху газу коефіцієнт тертя $\delta_{тр}$ залежить від величини критерію Рейнольдса й геометричної форми перетину каналу:

$$\delta_{тр} = \frac{A}{Re} \quad (2.4)$$

де A - коефіцієнт, що залежить від геометричної форми перетину каналу.

Його значення визначається за літературним даними.

При турбулентному режимі руху газу коефіцієнт тертя $\delta_{тр}$ залежить від

величини критерію Рейнольдса й шорсткості стінок. Для технічних труб і каналів печі з нерівномірною шорсткістю стінок коефіцієнт тертя f_{Tr} визначається по формулі А. Д. Альтшуля:

$$\delta_{Tr} = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_{np}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (2.5)$$

де Δ - середня абсолютна висота виступів шорсткості стінок, м.

У розрахунках втрат напору в трубопроводах і каналах використовують середню швидкість руху газу в даному перетині, обумовлений зі співвідношення:

$$W = \frac{V}{F} \quad (2.6)$$

де V - секундна витрата газу, м³/с.

При постійній площі поперечного переріза й незмінному тиску швидкість руху газу підкоряється закону:

$$W = W_0 (1 + \beta t) \quad (2.7)$$

Залежно від температури щільність газу визначається за формулою:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (2.8)$$

До місцевих опорів ставиться будь-який конструктивний елемент нагрівального пристрою або трубопроводу, що викликає зміну напрямку або швидкості руху газового потоку.

Величину витрат напору h_M на подолання місцевих опорів розраховують по формулі:

$$h_M = k \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho = k \cdot \rho_0 \cdot \frac{W_0^2}{2} (1 + \beta t), \text{ Н/м}^2 \quad (2.9)$$

де k - коефіцієнт місцевого опору, що визначає частку динамічного напору, необхідну для подолання потоку того або іншого місцевого опору. Коефіцієнт місцевого опору є безрозмірною величиною й визначається експериментально. Для ряду характерних випадків при проектуванні нагрівального пристрою коефіцієнт місцевого опору визначається по спеціальним довідковим даним.

Місцевий опір при переході вузької труби в широку або, навпаки, широкої у вузьку можна зменшити, використовуючи в першому випадку дифузор, а в другому - конфузор. Дифузор і конфузор являють собою усічені конуси, приєднані малою основою до вузької трубки, а більшим до широкої. Утворююча конуса повинна становити до осі потоку газу кут не більше 6-8° для запобігання відриву струменю газу від стінок, що супроводжується утворенням вихрів і збільшенням коефіцієнта місцевого опору. Зміна величини втрати напору газу в дифузорі залежить від різниці динамічних напорів між вузьким і широким його перетинами, а також від втрат на тертя. Коефіцієнт корисної дії дифузора розраховується по формулі:

$$h = \frac{h_{\text{дифуз}}}{\rho \cdot \left(\frac{W_1^2}{2} - \frac{W_2^2}{2} \right)} \quad (2.10)$$

де W_1 - швидкість газу у вузькому перетині, м/с;

W_2 - швидкість газу в широкому перетині, м/с.

2.3. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис.2.1) складається з вентилятора 1, досліджуваної системи трубопроводу 4, U -образного манометру 3, тагонапоромера Креля 5. Досліджувана система трубопроводу, являє собою зварений із гладких суцільнотягнутих труб стенд, що складається з наступних елементів: "ниши" - ділянки аа, дифузора - ділянки аб, раптового звуження - ділянки вв, повороту під кутом 90° - ділянки гг, повороту під кутом 60° - ділянки ее, повороту під кутом 30° - ділянки зз, прямолінійної ділянки зи, довжиною 0,68 м, раптового розширення - ділянки ии.

2.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

За допомогою шибера 2 і засувки 6 (рис. 2.1) установити заданий керівником тиск, створюваний вентилятором у точці А. При виключеному вентиляторі приєднати обоє гумові шланга тягонапоромера Креля 5 до трубок ділянки гг. Потім икдлючить вентилятор і виміряти величину втрат напору газу в місці повороту трубопроводу під кутом 90° - ділянка гг. Аналогічно вимірюється величина втрат напору газу на ділянках аа, аб, вв, гг, ее, зз, зи, ии. Під час від'єднання гумових шлангів від однієї ділянки трубопроводу для приєднання на іншій, вентилятор відключається. Вимірюють температуру повітря в лабораторії. Дані досвіду записують у табл.2.1.

Таблиця 2.1 Втрати напору й значення коефіцієнтів треніл і місцевих опорів на ділянках газопроводу:

№ п/п	Тиск газу в точці А	Температура повітря $t, ^\circ\text{C}$	Ділянка трубопроводу. ескіз	Втрати напору $h, \text{Н/м}^2$	Величина коефіцієнту витрат

По формулі (2.8) розраховують густину повітря. Густина повітря при нормальних умовах становить величину $1,293 \text{кг/м}^3$.

Знаючи величину втрат напору повітря h у трубопроводі на ділянці гг і коефіцієнт місцевого опору $k=1,5$, по формулі (2.9) розраховують швидкість W_1 . По формулі (2.6) розраховують секундне витрате у вузькому перетині 1-1 і

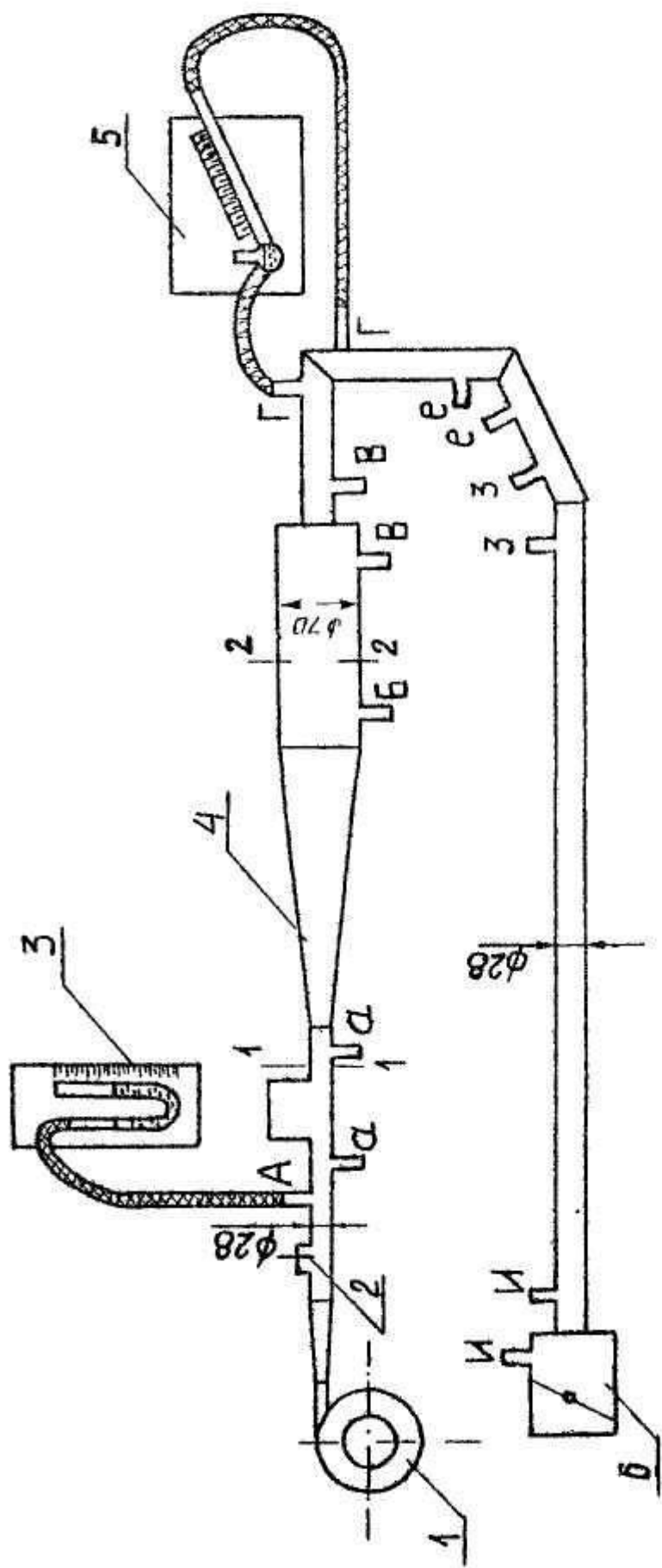


Рисунок 2.1 Схема лабораторної установки:

1 - вентилятор, 2 - шибер, 3 - U-образний манометр, 4 - дифузор, 5 - тангоналоромер Креля, 6 - засувка.

швидкість W_2 у широкому перетині 2-2 трубопроводу (діаметр вузького перетину дорівнює $d = 28$ мм, а площу $F_1 = 0.00062$ м²; діаметр широкого перетину дорівнює $D = 70$ мм, а площа $F_2 = 0.0038$ м²).

По величині втрат напору повітря h для ділянок трубопроводу аа, аб, вв, еє, зз по формулі (2.9) розраховують коефіцієнт місцевого опору. Для ділянки зз по формулі (2.1) розраховують коефіцієнт тертя, а для ділянки аб по формулі (2.10) розраховують коефіцієнт корисної дії дифузора. Дані досвіду й розрахунку зводяться в табл.2.1.

3. Лабораторна робота № 3

РОБОТА СТРУМИННОГО ПРИЛАДУ – ЕЖЕКТОРА

3.1. Мета роботи

Дослідити роботу струминного прибору-ежектора з різними розмірами знімного робочого сопла, на підставі дослідних і розрахункових даних установити оптимальний режим роботи ежектора.

3.2. Основні відомості про роботу струминних приладів

Струминні прилади призначені для нагнітання або видалення газів у нагрівальних пристроях. Принцип роботи струминних приладів заснований на властивості струменів газу, внаслідок в'язкості газів і турбулентної дифузії, захоплювати навколишнє середовище. Прилад називається інжектором, якщо його основним завданням є нагнітання змішаного потоку в простір за камерою змішання. Якщо прилад призначений для створення розрідження перед камерою змішання, він називається ежектором.

Ежектори застосовуються для видалення продуктів горіння з робочого простору нагрівального пристрою.

Потік повітря, що виходить із робочого сопла I, називається робочим або ежектуючим газом (рис.4.1). Виходячи із сопла з високою швидкістю, ежектуючий газ утворює струмінь, якому стінки змішувача не дозволяють захоплювати навколишню атмосферу. Тому ежектуючий газ приводить, внаслідок в'язкості газу й турбулентної дифузії, у рух частки газу, що перебувають перед входом у змішувач. Перед входом у змішувач створюється розрідження, що викликає просмоктування газів із зовнішнього середовища через вхід змішувача до поверхні струменя ежектуючого газу, що розширюється.

Потік, залучений у змішувач, називається ежектуємим газом.

Тиск ежектуємого газу P_2 у перетині F_2 завжди буде менше тиску суміші газів P_3 у перетині F_3 .

Ефективність роботи ежектора залежить від форми й розмірів змішувача. Якщо змішувач виконати у вигляді дифузора, то за рахунок зменшення втрат

напору при виході в атмосферу кількість ежектуемого газу зростає. Кут закриття дифузора повинен бути 6-8°. При збільшенні кута більше 12° внаслідок різкої зміни швидкостей відбувається більша втрата напору на удари часток одна об одну. При зменшенні внутрішніх розмірів змішувача, внаслідок збільшення швидкості руху газу, буде збільшуватися втрата напору при виході газу в атмосферу. В обох випадках об'єм ежектуемого газу буде зменшуватися. Об'єм ежектуемого газу також залежить від діаметра робочого сопла і його відстані від входу в змішувач - "горла" ежектора.

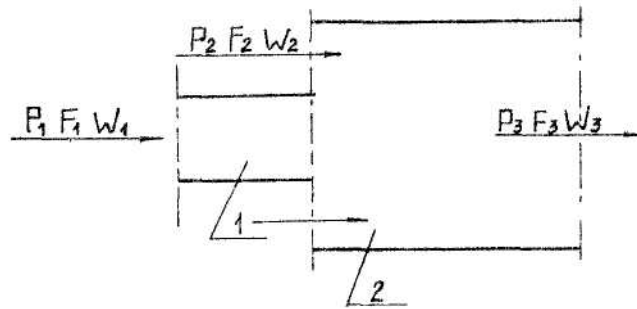


Рисунок 3.1 Схема роботи ежектора:

1 - робоче сопло; 2 - змішувач; F_1, F_2, F_3 - відповідно площі вихідного отвору робочого сопла, вхідного отвору в змішувач і змішувача; W_1, W_2, W_3 - відповідно швидкості ежектуемого газу, ежектуемого газу й суміші газів; P_1, P_2, P_3 - відповідно тиски ежектуемого газу, ежектуемого газу й суміші газів.

Для розрахунку струминних приладів використовують рівняння імпульсів:

$$\frac{m_1 \cdot W_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot W_2^2}{2} = \frac{m_3 \cdot W_3^2}{2} + \frac{m_1 (W_1 + W_3)^2}{2} + \frac{m_2 (W_1 - W_3)^2}{2} + (P_3 - P_2) \left(\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} \right) \quad (3.1)$$

де m_1, m_2, m_3 - відповідно масова витрата ежектуемого газу, ежектуемого газу й суміші газів, кг/з;

W_1, W_2, W_3 - відповідно швидкість ежектуемого газу, ежектуемого газу й суміші газів, м/с;

ρ_1, ρ_2 - відповідно густина ежектуемого й ежектуемого газів, кг/м³;

P_2, P_3 - відповідно тиск ежектуемого газу й суміші газів, Н/м².

Рівняння (3.1) виражає закон збереження енергії, відповідно до якого сума секундних кінетичних енергій ежектуемого й ежектуемого газів дорівнює секундній кінетичній енергії суміші газів плюс сума секундних кінетичних енергій загубленої швидкості для ежектуемого й ежектуемого газів плюс секундна робота протитиску.

3.3. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з вентилятора 1, змінного сопла 2, труби

Вентури 3 і циліндрична труби 4 (рис.3.2). Для виміру тиску газу в перетині 1-1 використовується стрілочний манометр ТМК-М, а в перетинах 2-2, 3-3, 4-4 - чашковий багатопозиційний манометр. Для виміру швидкості ежектуючого газу використовується анемометр.

3.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

Знімне робоче сопло 1 (рис 3.2) заданого діаметра встановити так, щоб площина його вихідного перетину збіглася с. площиною Б-Б, тобто в "горлі" ежектора. Потім установити трубу Вентури. Виміряти в перетині 1-1 стрілочним манометром тиск ежектуючого газу P_1 . Потім чашковим багатопозиційним манометром виміряти в перетині 2-2 тиск P_2 , а в перетинах

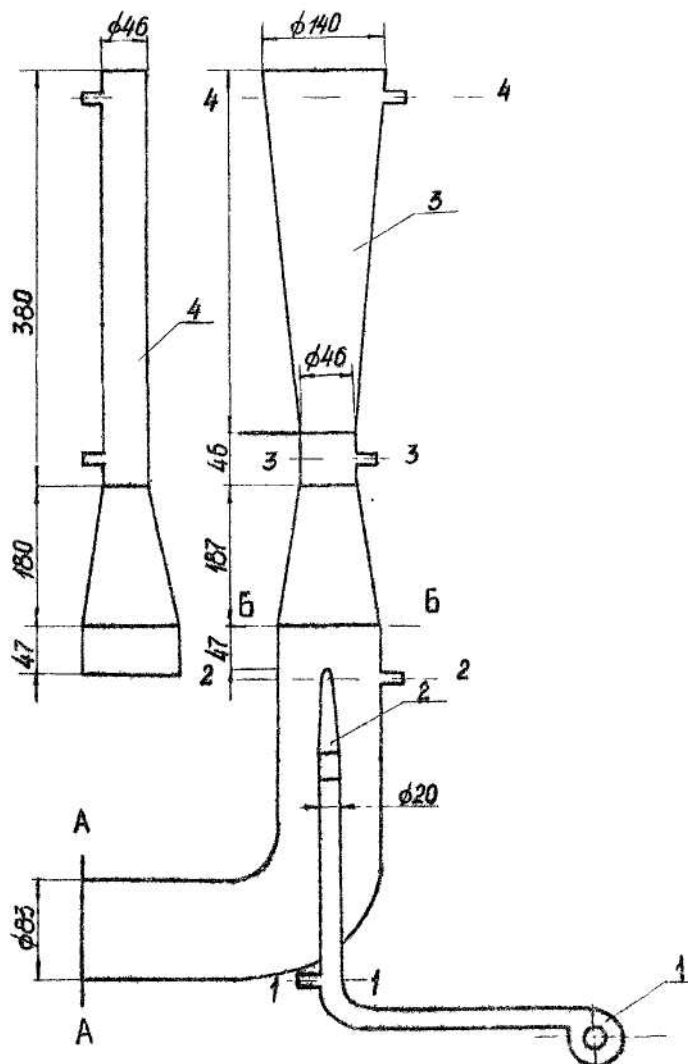


Рисунок 3.2 Експериментальна установка:

1 - вентилятор, 2 - зємне сопло, 3 - труба Вентури, 4 - циліндрична труба.

3-3 й 4-4 тиск P_3 і P_4 суміші ежектуючого й ежектуючого газів. У перетині А-А анемометром виміряти швидкість ежектуючого газу.

Установивши знімне сопло на відстані 47 мм нижче "горла" ежектора, зробити аналогічні виміри.

Замінити трубу Вентури циліндричною й зробити всі виміри, установивши сопло в "горлі" ежектора, а потім на відстань 47 мм нижче "горла" ежектора. Подібні виміри зробити ще для трьох сопів різного діаметра. Номера сопів задаються викладачем. Дані про сопла наведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1 Характеристика з'ємних сопел

№ сопла	Діаметр сопла, мм	Площа вихідного перетину сопла, м ²
1	10	0,000078
2	12	0,000113
3	15	0,000176
4	16	0,000200
5	18	0,000254
6	20	0,000314

Швидкість ежектуючого газу W_2 визначається за допомогою показань анемометра. Для цього необхідно число розподілів анемометра у секунду помножити на множник для перекладу показань анемометра на м/с (табл.3.2). Анемометр установлюється в перетині А-А (мал. 3.2) строго вертикально й визначається число оборотів протягом 60 с.

Швидкість ежектуючого газу W_1 розраховується по формулі (3.2):

$$W_1 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_3)}{\rho_t}} \quad (3.2)$$

де $\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}$ густина ежектуючого газу (повітря), кг/м³;

$\rho_0 = 1,293$ густина повітря при нормальних умовах, кг/м³;

t температура повітря;

$\beta = \frac{1}{273}$ коефіцієнт об'ємного розширення газу, °С⁻¹.

Знаючи площу в перетині вихідного отвору знімного сопла й труби F_2 яка дорівнює 0,0054 м², і швидкості ежектуючого W_1 й ежектуючого W_2 газів, розраховуються секундні витрати ежектуючого V_1 й ежектуючого V_2 газів по формулі (3.4):

$$V = F \cdot W \quad (3.4)$$

Швидкість суміші газів W_3 визначається по формулі (3.5):

$$W_3 = \frac{V_3}{f_3} = \frac{V_1 + V_2}{f_3} \quad (3.5)$$

де V_3 - секундна витрата суміші газів, м³/с;
 $F_3 = 0,00166 \text{ м}^2$ - площа в перетині 3-3 труби Вентури й циліндричної труби.

Таблиця 3.2 Множники для переведення показань анемометра м/с

Число поділок анемометра в секунду	Множники	Число поділок анемометра в секунду	Множники
1	1,22	11	0,95
2	1,10	12	0,95
3	1,05	13	0,95
4	1,03	14	0,95
5	1,01	15	0,94
6	0,98	16	0,94
7	0,97	17	0,94
8	0,87	18	0,94
9	0,96	19	0,94
10	0,96	20	0,94

Коефіцієнт корисної дії дифузора розрахувати з формули (3.7).
Збільшення статичного напору в дифузорі дорівнює:

$$P_3 - P_4 = \eta \cdot \frac{W_3^2 - W_4^2}{2} \rho_{\text{г}} \quad (3.6)$$

де P_3 і P_4 - відповідно тиску суміші газів у перетинах 3-3 й 4-4, Н/м²;
 η - коефіцієнт корисної дії дифузора;
 W_4 - швидкість суміші газів, м/с.

Таблиця 3.3 Журнал дслідку та розрахунків

Температура повітря °C	Тип змішувача (труба Вентури - В; циліндрична - Ц)	№ сопла	Місце встановлення сопла (в "горлі" - Г; нижче 47мм - Н)	Швидкість газу м/с				Тиск Н/м ²				Витрати м ³ /с			η	
				W ₁	W ₂	W ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	V ₁	V ₂	V ₃			

Значенням величини W_4 у порівнянні зі значенням величини W_3 можна знехтувати. Тоді збільшення статичного напору в дифузорі приблизно дорівнює:

$$p_3 - p_4 = \eta \cdot \frac{W_3^2}{2} \rho_t \quad (3.7)$$

По дослідним і розрахунковим даним визначити оптимальний режим роботи ежектора. Всі дослідні й розрахункові дані представити у вигляді табл.4.3.

4. Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ ВОГНЕТРИВІВ

4.1. Мета роботи

Вивчити метод визначення водопоглинення, відкритої й загальної пористостей способом насичення рідиною й гідростатичним зважуванням випробуваних зразків. Дослідити водопоглинення й відкрити пористість шамотних вогнетривів.

4.2. Загальні відомості

Вогнетривами називають будівельні матеріали, що володіють вогнетривкістю не нижче 1580°C и здатні протистояти фізичній і хімічній дії металів, їхніх окислів, шлаків і газів у печях.

Вогнетривкі матеріали застосовуються для спорудження різних плавильних, термічних і сушильних печей й установок, футеровки ковшів для розливання металів і сплавів відповідно до їх властивостей й економічною доцільністю. Основними вимогами, пропонованими до вогнетривів, є опір високим температурам, термостійкість і стійкість проти хімічного впливу різних газових і розплавлених середовищ.

Всі властивості вогнетривів підрозділяють на фізичні й робочі. До робочих властивостей вогнетривів ставляться вогнетривкість, термостійкість, механічна міцність, шлакостійкість, сталість об'єму, правильність форми й розмірів, а до фізичних - пористість, газопроникність, теплопровідність, теплоємність, електропровідність.

Стійкість вогнетривів проти впливу розплавлених металу й шлаків, а також розпеченої грубої атмосфери багато в чому залежить від пористості, що коливається: у широких межах: від 1% у плавлені й понад 85% в ультра легких вогнетривких виробках. Зі збільшенням пористості вогнетривів значно зростає поверхня їхнього контакту з розплавом і грубою атмосферою, різко знижується шлакостійкість вогнетривів.

Пористість вогнетривких виробів залежить від сполуки шихти, якості готування формувальної маси, режиму процесів пресування, сушіння й випалу. Розміри пор, їхня структура й кількість у вогнетривких виробках досить різні.

Величина пор коливається від декількох міліметрів до сотих часток мікрона. У вогнетривких виробках пори розподілені нерівномірно: великі пори зосереджені між зернами й сполучною частиною, а дрібні - у самих зернах.

Пористість обпалених виробів являє собою комбінацію невеликих об'ємів, зв'язаних між собою капілярами, або повністю ізольованих друг від друга малих об'ємів, заповнених газом. Пори можуть бути відкритими, тобто вони з'єднуються з навколишньою атмосферою; наскрізними, коли вони проходять наскрізь через виріб; і закритими. Тому пористість ділиться на три види: загальна, відкрита і закрита.

Загальна пористість $P_{\text{общ}}$ характеризується відношенням об'єму всіх (закритих і відкритих) пор виробу до його об'єму, вираженим у відсотках.

Відкрита пористість $P_{\text{отк}}$ характеризується відношенням об'єму відкритих (сполучених між собою й навколишнім середовищем) пор виробу до його об'єму, вираженим у відсотках.

Закрита пористість $P_{\text{зак}}$ характеризується відношенням об'єму пор у виробі, ізольованих друг від друга й від навколишнього середовища, до його об'єму, вираженим у відсотках.

Чим більше відкрита пористість, тим гірше вогнетрив протистоїть роз'їдаючій дії шлаків, металів і газів, які попадають усередину вогнетривкого виробу.

Залежно від відкритої пористості виробу підрозділяються відповідно до табл.4.1:

Таблиця 4.1 Наіменування виробів в залежності від пористості

№ п/п	Наіменування виробу	Відкрита пористість, %
1.	Особливощільні	до 3
2.	Високощільні	понад 3 до 10
3.	Щільні	понад 10 до 16
4.	Ущільнені	понад 16 до 20
5.	Звичайні	
	1 підгрупа	понад 20 до 24
	2 підгрупа	понад 24 до 30
6.	Легкі	понад 45 до 85*
7.	Ультралегкі	понад 85*

* Для легких та ультралегких виробів норма дана по загальній пористості.

Визначення пористості вогнетривких виробів звичайно роблять через водопоглинення. Водопоглинення W , виражене у відсотках, являє собою відношення маси води, поглиненої зразком при повному насиченні й температурі 20°C, до маси сухого зразка.

$$W = \frac{M_I - M}{M} \cdot 100 \quad (4.1)$$

де M - маса сухого зразка при зважуванні в повітрі, г;

M_1 - маса зразка, насиченого рідиною, при зважуванні в повітрі, г.

Після насичення зразків рідина виробляється гідростатичне зважування й обчислення відкритої пористості у відсотках:

$$P_{отк} = \frac{M_1 - M}{M_1 - M_2} \cdot 100 \quad (4.2)$$

де M_2 - маса гир, що врівноважують насичений рідиною про-разец при зважуванні його в рідині, г.

Загальна пористість у відсотках зразків обчислюється по формулі 4.3:

$$P_{общ} = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho}\right) \cdot 100 \quad (5.3)$$

де ρ - щільність зразка в г/см^3 , обумовлена за ГОСТ 2211-65;

ρ_1 - гадана щільність у г/см^3 , що обчислює по формулі 4.4:

$$\rho_1 = \frac{M \cdot \rho_{ж}}{M_1 - M_2} \quad (4.4)$$

де $\rho_{ж}$ - густина рідини, застосовуваної для насичення й гідростатичного зважування, г/см^3 , (для води приймається 1 г/см^3).

Закриту пористість зразка визначають як різниця загальної й відкритої пористості:

$$P_{зак} = P_{общ} - P_{отк} \quad (4.5)$$

Для насичення зразків рідиною застосовують вакуумний спосіб. Зразки піддають вакуумуванню у вакуумній установці до одержання залишкового тиску нижче $133,3 \text{ Па}$ (1 мм рт.ст.) при відсутності в системі рідини. Потім у вакуумуванні посуд поступово подають стільки рідини, щоб зразок був повністю нею покритий, Після припинення подачі рідини посудина зі зразком з'єднується із атмосферою. Вогнетриви, не взаємодіючі з водою, насичують водою. Вогнетриви, взаємодіючі з водою при кімнатній температурі, насичують гасом.

4.3. Відбір і підготовка зразків

Зразки для випробування повинні бути об'ємом від 50 до 250 см^3 . Для виробів масою менш 1 кг допускається випробування зразків об'ємом від 5 см^3 і вище. Зразки з кускових матеріалів повинні мати об'єм не менш 50 см^3 . Зразки виготовляють із виробів або кускових матеріалів різанням або відколюванням з наступної шліфовкою нерівностей поверхні й гострих кутів і ретельним видаленням пилу. При виготовленні зразків допускається застосування охолоднюючої рідини, що не взаємодіє з матеріалом виробу, При цьому поверхнева кірка виробу повинна залишатися неушкодженою, якщо її видалення не обговорене в нормативно-технічній документації на вогнетривкі вироби.

Від виробів призматичної форми зразки відрізають або відколюють від

одного із тригранних кутів, а від виробів, що мають форму обертання, від середньої по висоті частини виробу, якщо в стандартах на даний вид виробів не обговорене місце відбору зразків.

Визначення об'єму зразків відбувається гідростатичним зважуванням у тій рідині, який вони насичуються.

4.4. Апаратура для визначення пористості виробів

Для визначення пористості зразків використовуються сушильний шкаф, ексикатор, ваги із припустимою погрішністю зважування $\pm 0,25$, лабораторна вакуумна установка для насичення зразків рідиною (рис.4.1), установка для гідростатичного зважування (рис.4.2).

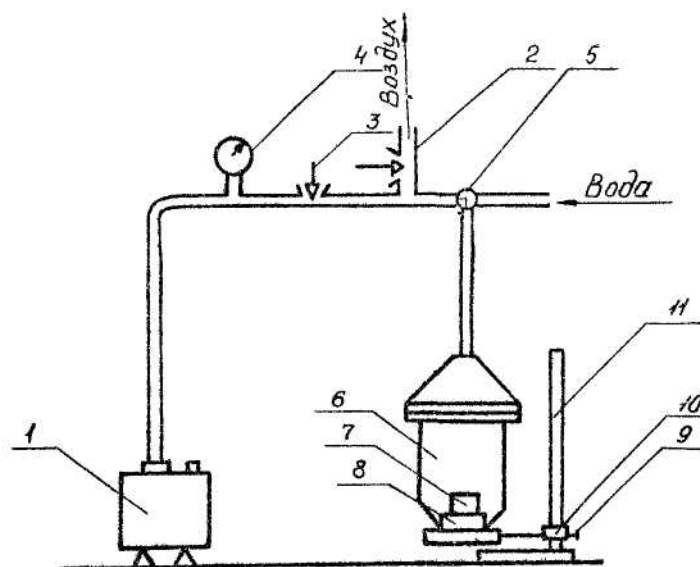


Рисунок 4.1 Схема лабораторної вакуумної установки для насичення зразків рідиною:

1 - вакуумний насос; 2,3 - вакуумні металеві крани; 4 - вакуумметр; 5 - триходовий вакуумний кран; 6 - вакуумний ексикатор; 7 - зразок; 8 - гратчаста підставка; 9 - рукоятка; 10 - фіксатор, 11 - механізм підйому ексикатора.

4.5. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

Зразок із шамотних виробів очищається від пилу щіткою й висушується до постійної маси при $110-135^{\circ}\text{C}$, Маса вважається постійною, якщо при проведенні двох зважувань, що впливають один за одним через одна година сушіння, різниця маси становить менш $0,1\%$ результату останнього зважування. Сухі зразки до випробування зберігаються в ексикаторе.

Підготовлений до випробування зразок виймається з ексикатора й зважується з точністю до $0,1$ г. на вагах. Потім зразок міститься у вакуумний ексикатор 6 (рис. 4.1) на гратчасту підставку 8. За допомогою рукоятки 9 механізму підйому ексикатора 11 піднімається нагору й щільно з'єднується із

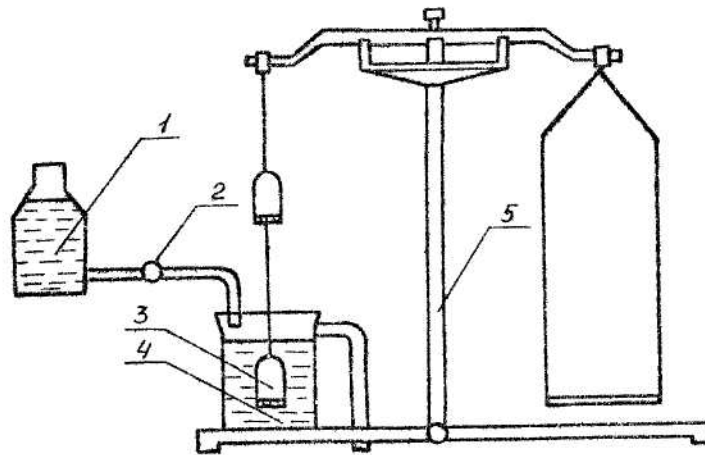


Рисунок 4.2 Схема установки для гідростатичного зважування:

1 - посудина з водою, 2 - кран, 3 - сітка, 4 - посудина зі зливальною трубкою, 5 - ваги.

кришкою эксикатора. За допомогою фіксатора 10 фіксується положення эксикатора. Закривається кран 2, що з'єднує систему з навколишнім середовищем, і відкривається кран 3, що з'єднує вакуумний насос I з об'ємом эксикатора через кран 5. Зразок піддають вакуумування до одержання залишкового тиску, не перевищуючого парціальний тиск пару води -2000 Па ($15 \text{ мм рт.ст. при } 17,5^\circ\text{C}$). Створюване розрядження в системі визначається за допомогою вакуумметра. Зразок втримується під вакуумом протягом 15 хв. Закривається кран 3, вимикається насос 1. До системи приєднується водяний шланг. За допомогою крана 5 в эксикатор подається вода так, щоб не менш чим за 3 хв. зразок був покритий водою вище верхньої його крайки на 10 мм. Потім кран 5 ставиться в таке положення, щоб з'єднати внутрішній об'єм эксикатора через кран 3 з атмосферою. Відкривається кран 3. За допомогою рукоятки эксикатор опускається. З нього виймається зразок. З усією поверхні зразка віддаляється надлишкова вода за допомогою бавовняної тканини, попередньо змоченої й віджатої, зразок негайно зважується.

Потім відбувається гідростатичне зважування зразка. Для чого зразок ставиться на сітку 3 (рис.4.2), що міститься в посудину 4. За допомогою ваг 5 визначається маса гир, що врівноважують насичений водою зразок.

У роботі роблять дослідження шамотних вогнетривів. Відкрита пористість обчислюється по формулі 4.2, а водопоглинення - по формулі 4.1.

По величині відкритої пористості за допомогою табл.4.1 визначається найменшання виробу залежно від його пористості.

5. Лабораторна робота № 5
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТІЛА, ЩО
ОХОЛОДЖУЄТЬСЯ

5.1. Мета роботи

Дослідити залежність сумарного коефіцієнта тепловіддачі й приведеного коефіцієнта випромінювання від температури тіла. Зрівняти роль тепловіддачі вільною конвекцією й випромінюванням при різних температурах тіла, що охолоджується.

5.2. Загальні відомості

При охолодженні тіла кількість тепла, що губиться в навколишнє середовище за час $d\tau$ визначається по рівнянню:

$$dQ = \alpha_{об} (t_{пов} - t_{ок}) \cdot F \cdot d\tau \quad (5.1)$$

де $t_{пов}$ - температура поверхні тіла, °С;

$t_{ок}$ - температура навколишнього середовища, °С;

F - площа поверхні тіла, що охолоджується, m^2 ;

$\alpha_{об}$ - сумарний коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Цю кількість тепла можна визначити також по зміні ентальпії тіла:

$$dQ = C \cdot M \cdot dt_{ср} \quad (5.2)$$

де C - питома теплоємність тіла при даній температурі, При дослідженні мідних зразків теплоємність можна прийняти постійною величиною, тобто $C = 398$ Дж/(кг·К)

M - маса тіла, кг;

$t_{ср}$ - середня по масі температура тіла, що проохолоджується, °С.

Якщо тіло, що охолоджується має високий коефіцієнт теплопровідності й малу товщину, то різницею температур по перетині зневажити, дорівнявши праві часті рівнянь (5.1) і (5.2), одержимо для швидкості охолодження наступне вираження:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha_{об} (t - t_{ок}) F}{C \cdot M} \quad (5.3)$$

Вимірюючи температуру тіла, що охолоджується, у різні моменти часу, можна побудувати графік залежності $t=f(\tau)$ та потім графічним шляхом знайти значення для різних значень температури. При відомих значеннях швидкості охолодження, маси, розмірів і питомої теплоємності тіла по рівнянню (5.3) можна розрахувати величину сумарного коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{об}$.

Тепло віддається поверхнею тіла як конвекцією, так і випромінюванням, тому сумарний коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{об}$ дорівнює сумі коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією α_k й випромінюванням $\alpha_{и}$.

$$\alpha_{об} = \alpha_k + \alpha_{и} \quad (5.4)$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{и}$ з рівняння (5.4), необхідно розрахувати коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k .

При вільній конвекції виникає рух повітря біля тіла, що охолоджується, у результаті різниці його щільностей: більше легкі частки повітря піднімаються нагору, а більше важкі опускаються вниз. Різниця щільностей найчастіше виникає внаслідок нерівномірності температурного поля повітря. Повітря, що перебуває поблизу гарячої поверхні тіла, нагрівається й піднімається нагору. На його місце приходять нові холодні об'єми, які також нагріваються. Створюється стаціонарний плин повітря нагору по поверхні тіла. Швидкість потоку тим вище, чим більше перепад температур між тілом і повітрям. Границями потоку при вільній конвекції вважають поверхня теплообміну й нерухоме повітря на такому видаленні від цієї поверхні, де її дія не позначається. У цьому випадку гранична швидкість дорівнює нулю.

Встановлено, що безрозмірні граничні температури й геометричні параметри незначно впливають на середній по поверхні безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі. Тому для визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією використовують критеріальне рівняння для тепловіддачі

$$Nu = \delta (\beta_r \cdot Pr)^n \quad (5.5)$$

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot d}{\lambda} \quad \text{критерій Нуссельта;}$$

$$Pr = \frac{\rho \cdot c}{\alpha} \quad \text{критерій Прандтля;}$$

$$\beta_r = \frac{\beta \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad \text{критерій Грасгофа;}$$

де α_k - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією Вт/(м²*К);

d - діаметр охолоджуваного зразка, м;

λ - коефіцієнт теплопровідності середовища, у якій відбувається охолодження (повітря) Вт/(м*К),

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с;

$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - коефіцієнт температуропровідності повітря, м²/с;

$\beta = 1/273$ - коефіцієнт об'ємного розширення газу, 1/град;

$g = 9.81$ - прискорення сили тяжіння, м/с²;

c - теплоємність повітря, Дж/(кг*К);

ρ - густина повітря, кг/м³.

$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ок}}$ - різниця температур поверхні зразка й навколишнього повітря $t_{\text{ок}}$. Температура повітря $t_{\text{ок}}$; визначається по термометрі на великому видаленні від охолоджуваного тіла.

При виводі критеріального рівняння 5.5 було прийнято, що фізичні параметри навколишнього середовища не залежать від температури. Практично ж така залежність існує. Тому фізичні параметри навколишнього середовища λ, ν, α варто брати по табл.5.1 при середній температурі:

$$t = \frac{1}{2} (t_{\text{пов}} - t_{\text{ок}}) \quad (5.6)$$

Таблиця 5.1 Фізичні константи повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	$\rho \cdot 10^{-3}$
0	0,183	13,28	2,44	0,722
50	0,253	16,60	2,83	0,722
100	0,337	23,13	3,22	0,722
150	0,425	28,99	3,58	0,722
200	0,514	35,85	3,93	0,722
250	0,610	40,61	4,27	0,722
300	0,715	48,33	4,61	0,722
400	0,930	63,09	5,22	0,722
500	1,155	79,38	5,75	0,723
600	1,381	96,09	6,23	0,724
700	1,630	115,40	6,10	0,725
800	1,880	134,80	7,18	0,725

Результати численних досліджень із тілами різної форми й різних рідинами і газами добре укладаються на загальну криву (рис.5.1),

Криву, зображену на рис. 5.1, можна розбити на три прямолінійних ділянки, причому n и δ для кожної ділянки є функцією добутку $\delta_r P_r$ значення наведені в табл. 5.2,

Ділянка кривії 1 відповідає випадку, коли на поверхні теплообміну утвориться майже нерухома плівка. Цей режим називають плівковим. Ділянка кривії 2 відповідає ламінарному, а дьялянка 3 - турбулентному режиму руху. Тому що лінійний масштаб d входить у критерій Nu у першому ступені, а в критерій δ_r у кубі, то при $n = 1/3$ процес теплообміну взагалі не залежить від геометричних розмірів тіла. Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в обмеженому просторі також користуються рівнянням (5.5), але з іншими значеннями коефіцієнтів n та δ , запропонованими М. А. Міхєєвим.

5.3. Опис лабораторної установки.

Установка (рис.5.2) складається із шахтної електропечі опору СНОЛ - 1,0-1,0-2,5/12 1, у якій нагрівається до заданої температури мідний зразок 2. Торці зразка ізольовані теплоізоляційним матеріалом, щоб віддача тепла в навколишнє середовище при охолодженні відбувалася тільки з його циліндричної поверхні. У середину зразка вмонтована хром-алюмінієва термопара 3, з'єднана з потенціометром 4, Температура в печі регулюється потенціометром 6.

Розміри зразка: діаметр $a = 30$ мм, довжина $l = 150$ мм,

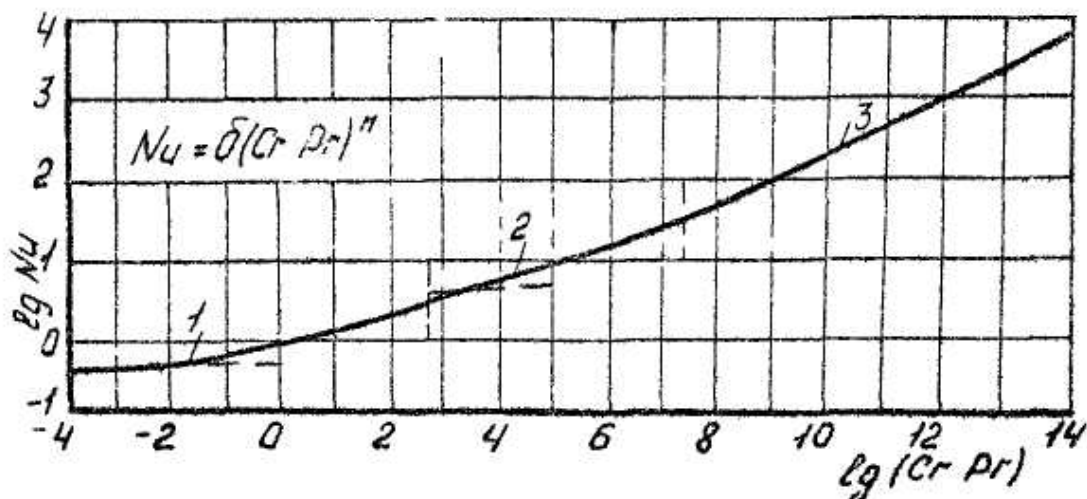


Рисунок 5.1 Тепловіддача різних тіл при вільному русі рідини або газу.

Таблиця 5.2 Значення n та δ у рівнянні (5.5)

	$Gr \cdot Pr$	δ	n
1	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
2	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
3	$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

5.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

У розігріту електропіч опору 1 (рис. 5.2) до температури, заданої викладачем, завантажується мідний циліндричний зразок 2. Після нагрівання зразка до температури на $20-30^\circ\text{C}$ нижче температури печі він швидко вивантажується з печі й підвішується на штатив 5. Не гублячи часу, виміряється температура зразка: перші 10 вимірів проводяться через кожні 15 з, а потім - через 30 с. Виміри температури проводяться доти, поки зразок не остудиться до температури, заданої викладачем.

За отриманим даними будується графік залежності температури від часу охолодження зразка $t=f(\tau)$. Графік необхідно будувати на міліметровці й час охолодження відкладати в секундах!. До отриманої кривої в 8-10 точках, заданих значень температури викладачем, проводяться дотичні й визначається для точки швидкість охолодження зразка .

Швидкість охолодження зразка в даній точці кривої дорівнює тангенсу кута нахилу відповідної дотичної до осі абсцис. Визначаючи тангенс кута нахилу дотичній по відношенню відрізків, що відтинають його на координатних осях, необхідно ці відрізки вимірювати не в лінійних одиницях, а в одиницях, по яких будується крива, тобто в градусах і секундах.

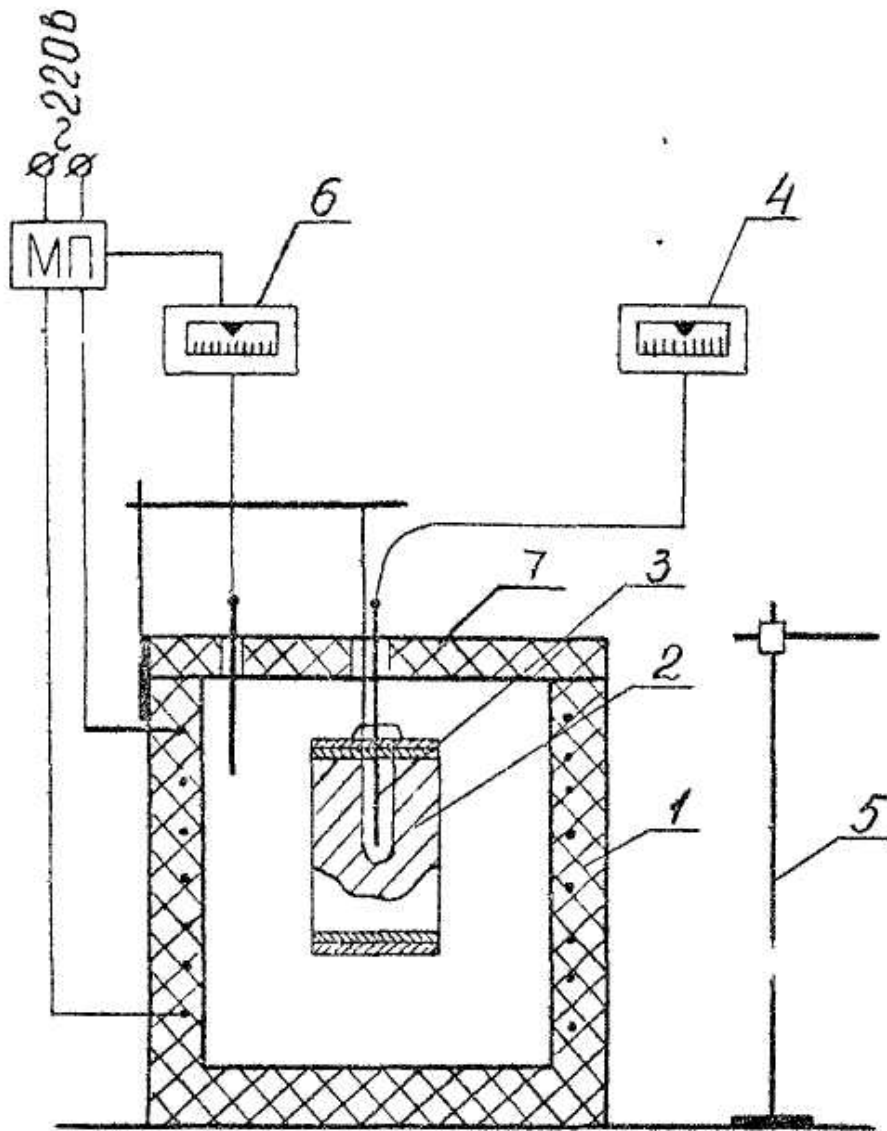


Рисунок 5.2 Схема лабораторної установки:

1 - електропіч опору; 2 - мідний циліндричний зразок; 3 - термопара ХА; 4 - потенціометр; 5 - штатив; 6 - регулюючий потенціометр; 7 - заслінка печі.

Визначивши швидкість охолодження зразка з рівняння 5.3 обчислюється сумарний коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{об}$. Із критеріального рівняння для тепловіддачі вільної конвекції 5.5 обчислюється коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k , а з рівняння 5.4 - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{и}$. По величині $\alpha_{и}$ обчислюється коефіцієнт випромінювання мідного зразка $C_{и}$:

$$C_{и} = \frac{\alpha_{и}(T - T_{ок})}{\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{ок}}{100}\right)^4}$$

(5.7)

По отриманим розрахунковим даним будуються графіки залежності від температури сумарного коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{об}$, коефіцієнта тепловіддачі конвекцією α_k , тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{и}$ коефіцієнта випромінювання $C_{и}$.

6. Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОМЕНИСТОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПЕЧАХ

6.1. Мета роботи

Дослідити променистий теплообмін у робочому просторі електропечі опору СНОЛ-1,0-2,0-0,В/9. Визначити залежність теплових потоків при нагріванні тіл, виготовлених з одного матеріалу й маючих однакову форму й розміри, але при різних ступенях чорності їхньої поверхні.

7.2. Променистий теплообмін у робочому просторі печі

У високотемпературних печах тепло передається нагріваним матеріалам, в основному за рахунок енергії випромінювання. Уже при температурі печі 800°C частка конвекційного теплообміну становить не більше 10-12% енергії, витраченої на нагрівання. Зі збільшенням температури печі понад 800°C це співвідношення ще більш різко змінюється на користь променистої теплопередачі. Так, при температурі печі 1000°C частка конвекційного теплообміну становить усього 3-5%,

Основною характеристикою, що визначає якість передачі енергії нагріваним тілам, у робочому просторі печі, є приведений коефіцієнт випромінювання C_n . Його значення в рівнянні Стефана-Больцмана для сірих тіл вказує, які можливості має випромінююча система для передачі тепла металу при температурах випромінюючого середовища T_p і тепло сприймаючої поверхні виробу $T_{пов}$:

$$q = C_n \left[\left(\frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right] \quad (6.1)$$

де q - щільність теплового потоку, Вт/м² ;

C_n - наведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²*К⁴).

Для наведеного коефіцієнта випромінювання знайдені теоретичні залежності, що дозволяють при різних умовах роботи печі визначати характеристики променистого теплообміну. У загальному виді ця залежність може бути представлена наступним рівнянням:

$$C_n = f(\epsilon_m; \epsilon_r; \epsilon_k; F_m; F_k; C_0) \quad (6.2)$$

де C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²*К⁴);

Σ_m - ступінь чорності металу;

Σ_k - ступінь чорності випромінюючої кладки печі;

Σ_r - ступінь чорності випромінюючих газів у печі;

F_m і F_k - відповідно поверхні металу, що нагрівається і кладки печі, м².

Для більшості металургійних печей ступінь чорності кладки без великої погрешності може бути прийнята рівній одиниці ($\Sigma_k = 1$), тому одиниці ($\Sigma_k = 1$),

тому рівняння для пічного об'єму, заповненого випромінюючими газами, має вигляд:

$$C_n = f(\epsilon_m; \epsilon_r; F_m; F_k; C_0) \quad (6.3)$$

Рівняння (6.3) може бути вирішено лише для конкретних умов, що залежать від співвідношень поверхонь і форми пічного об'єму, від взаємного розташування гріючих та нагріваних поверхонь та ін.

Основним фактором, що визначає якість теплообміну в робочому просторі печі, є випромінювальна здатність металів - їхній ступінь чорноти.

6.3. Опис лабораторної установки

Зразок 1 нагрівається в електропечі опору СНОЛ - 1,6*2,0-0,8/9 (рис.6.1). Температура в робочій печі підтримується сталою за допомогою регулюючого потенціометра 3.

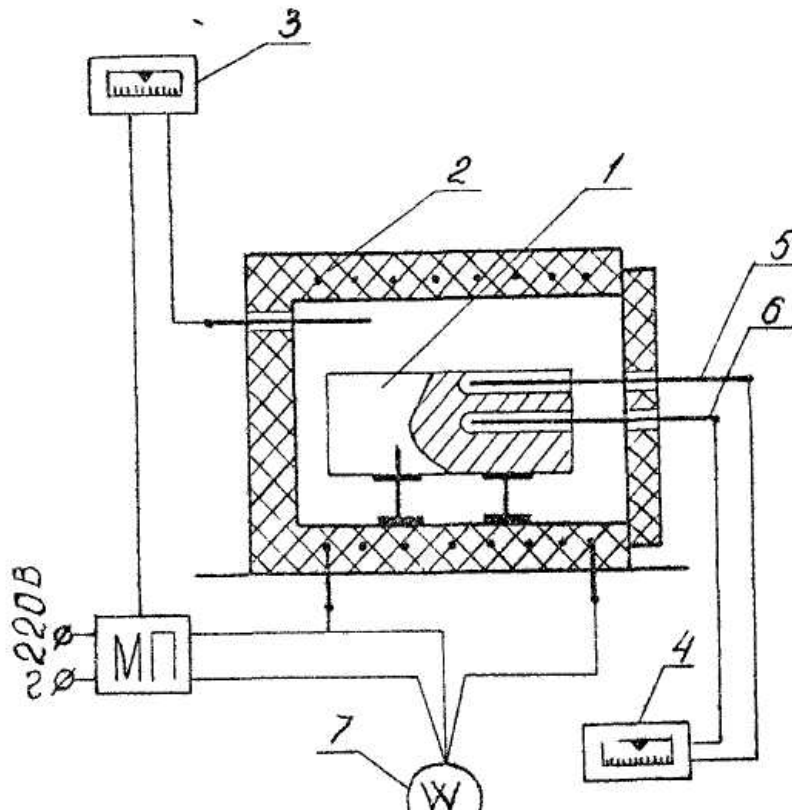


Рисунок 6.1 Лабораторна установка для дослідження променистого теплообміну в печах:

1 - зразок, 2 - електропіч опору СНОЛ-1,6*2,0-0,8/9, 3 - регулюючий потенціометр, 4 - багатопозиційний потенціометр, 5 - термопара ХА для виміру температури поверхні зразка, 6 - термопара ХА для виміру температури центра зразка, 7 - лічильник.

Зразки виготовлені з міді. Поверхня одного зі зразків покрита тонким шаром речовини, що добре відбиває променисту енергію ($\Sigma_{m1} = 0,05$), а поверхня другого - без покриття, окислена ($\Sigma_{m2} = 0,95$). Для вимірювання

температури при нагріванні поверхні й центра зразка, у ньому встановлені термомпари 5 й 6, приєднані до багатопозиційного потенціометра 4. Витрата електроенергії на нагрівання зразка вимірюється однофазним лічильником 7.

6.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

У піч при сталій заданій температурі t_n завантажується один зі зразків з початковою температурою t_n . Перед завантаженням зразка в піч записуються показання лічильника, значення температури печі t_n , поверхні $t_{пов}$ та центра $t_{ц}$ зразка. У процесі нагрівання зразка в печі вимірюється температура печі, поверхні $t_{пов}$ і центра $t_{ц}$ зразка й витрата електроенергії. Інтервал виміру - 15 с. При досягненні заданої викладачем температури поверхні зразок вивантажується з печі. Після нагрівання першого зразка, коли в печі знову встановиться встановлена температура t_n , завантажують другий зразок і повторюють дослід.

Таблиця 6.1		Результати досліду				
№ зразка		Час відліку, с				
		0	15	30	45	60
1 зразок	температура печі, °C					
	температура поверхні зразка, °C					
	температура центра зразка, °C					
	показання лічильника кВт·ч					
2 зразок	температура печі, °C					
	температура поверхні зразка, °C					
	температура центра зразка, °C					
	показання лічильника кВт·ч					

Отримані дані дозволяють знайти теплові характеристики печі при нагріванні тіл з різними ступенями чорності. Для обчислення зміни теплових потоків з процесі нагрівання тіл користуються рівнянням 6.1, що з обліком конвекційної тепловіддачі має вигляд:

$$q = k C_n \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пав}}{100} \right)^4 \right] \quad (6.4)$$

де k - коефіцієнт, що враховує конвективний теплообмін. Для лабораторної печі СНОЛ-1,6-2,0-0,8/9 можна прийняти $k = 1.1$.

Приведений коефіцієнт випромінювання для системи піч - зразок

обчислюється по формулі 6.5:

$$C_n = C_0 \frac{\epsilon_m}{\epsilon_m + \frac{F_m}{F_k} (1 - \epsilon_m)} \quad (6.5)$$

де C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,

F_m - площа поверхні нагрівається зразка, m^2 ;

F_k - площа поверхні робочого простору (кладки) печі, m^2 .

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(m^2 K^4); \quad F_m = 0,0275 \text{ м}^2; \quad F_k = 0,1938 \text{ м}^2.$$

Оскільки тепловий потік у процесі нагрівання зразків змінюється, то необхідно обчислити значення щільності теплових потоків по формулі (6.4) для початкових і кінцевих температур нагрівання, а також для трьох-чотирьох значень проміжних температур, заданих викладачем.

Потім розраховується коефіцієнт корисного використання тепла η_m , для двох випробуваних зразків:

$$\eta_m = \frac{Q_m}{Q} \cdot 100\% \quad (6.6)$$

де Q_m - кількість тепла, акумульована в зразку, тобто кількість тепла, що витрачається на нагрівання зразка, кДж

Q - загальна кількість тепла, що передається печі, кДж

Тепло, що витрачає на нагрівання зразка, обчислюється за формулою 6.7:

$$Q_m = M(l_2 - l_1) \quad (6.7)$$

де M - маса зразка, що нагрівається, кг;

l_1 та l_2 - відповідно ентальпія матеріалу зразка при початковій і кінцевій температурах нагріву.

Для випробуваних зразків маса дорівнює $M = 2,142$ кг.

Для визначення ентальпії необхідно визначити зміну середньої температури зразка по обмірюваних температурах його поверхні $t_{пов}$ і центра $t_{ц}$:

$$t_{ср} = t_{ц} + \frac{t_{пов} - t_{ц}}{K_1} \quad (6.8)$$

де K_1 - коефіцієнт усереднення температур у тілі.

Коефіцієнт усереднення температур у тілі K_1 залежить від форми зразка й критеріального співвідношення:

$$\Theta = \frac{t_{пов} - t_{ц}}{t_{п} - t_{пов}} \quad (6.9)$$

Значення коефіцієнта усереднення температур у тілі K_1 залежно від форми тіла й значення критеріального співвідношення вибирається по табл.7.2.

Потім розраховуються початкова й кінцева ентальпії зразків:

$$\begin{aligned} l_1 &= C_1 \cdot t_{ср1} \\ l_2 &= C_2 \cdot t_{ср2} \end{aligned} \quad (6.10, 6.11)$$

Таблиця 6.2 Значення коефіцієнта усереднення температур в тілі

$\theta = \frac{t_{пов} - t_{ц}}{t_n - t_{пов}}$	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	25	50
Плита	3,00	2,93	2,88	2,86	2,84	2,83	2,8	2,76	2,75
Циліндр	2,00	1,94	1,89	1,87	1,85	1,84	1,8	1,83	1,76
Куля	1,67	1,61	1,57	1,55	1,53	1,51	1,48	1,45	1,43

де C_1 і C_2 , - відповідно середні питомі теплоємності матеріалу зразка в інтервалі температур $0 - t_{cp1}$ та $0 - t_{cp2}$

Значення теплоємності міді C визначається по табл.6.3.

Таблиця 6.3 Теплоємність міді C , Дж / (кг·°C)

Температура, °C	0	100	200	400	600	800	1000
Середня тепло- ємність	0,389	0,392	0,393	0,406	0,414	0,423	0,431

Витрата електроенергії P , витраченої на нагрівання зразка визначається за показниками лічильника:

$$P = P_2 - P_1 \quad (6,12)$$

де P_1 і P_2 - відповідно початкове й кінцеве показання лічильника під час досліду,

Загальна кількість тепла, повідомлена печі, обчислюється по формулі 6.13:

$$Q = \frac{3600 \cdot P}{K_3} \quad (6.13)$$

де K_3 - коефіцієнт запасу, що враховує можливість зниження напруги в електролінії, погіршення теплової ізоляції печі(для печей СНОЛ-1,6-2,0-0,8/9 – K_3 приймається рівним 1,1-1,2).

Розрахунки виконуються для двох зразків.

За результатами експерименту й розрахунків будується для кожного зразка окремо графік, на якому вказуються зміни середньої температури зразка й питомих теплових потоків у часі.

7. Лабораторна робота № 7

НАГРІВАННЯ Й ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНО "ТОНКИХ" ТІЛ

7.1. Мета роботи

Дослідити нагрівання й охолодження теплотехнічно й геометрично "тонких" тіл, виготовлених з різних матеріалів. Зробити порівняння зміни

температурного поля в часі при нагріванні й охолодженні тіла, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом.

7.2. Загальні відомість про нагрівання "тонких" тіл

Нагрівання тіл у робочому просторі печі являє собою складне явище, яке можна розділити на два процеси:

7.2. 1. Передача тепла на поверхню нагріваємого тіла.

7.2. 2. Поширення тепла з поверхневих шарів у глибину тіла. Співвідношення між кількістю тепла, отриманим поверхнею тіла, що нагрівається, і кількістю тепла, відведеним від поверхні усередину тіла, характеризується критерієм Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} \quad (7.1)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К);

S - $\mu \cdot \delta$ - характерний розмір тіла, м;

μ - коефіцієнт несиметричності нагрівання тіла (при двостороннім нагріванні $\mu = 0,6$; при однобічному нагріванні $\mu = 1$);

δ - товщина тіла, що нагрівається;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, з якого виготовлене тіло.

Якщо значення критерію Bi - велике, тоді процес теплопередачі тепла на поверхню відбувається інтенсивніше його відводу усередину тіла. При цьому нагрівання буде відбуватися при великій різниці температур між поверхнею й центром тіла, що нагрівається. Якщо значення критерію Bi мало, що відповідає більше інтенсивному відводу тепла усередину тіла, то різниця температур по перетині тіла, що нагрівається, буде невеликою.

У першому випадку має місце "масивне" з погляду нагрівання, тіло; у другому - "тонке". Розрахунок нагрівання "тонких" тіл значно простіше, ніж "масивних", тому що різницею температур по перетину тіла можна знехувати й уважати, що в кожен момент часу температура по всій масі однакова й дорівнює температурі поверхні.

При значенні критерію $Bi \leq 0,25$ тіла вважаються "тонкими", а при $Bi \geq 0,50$ - "масивними", Значення критерію $0,25 < Bi < 0,5$ являють собою перехідну область, що залежно від призначення технології нагрівання необхідно відносити до "масивних" або "тонким" тіл. Так при нагріванні заготовель під пластичну деформацію цю область відносять до "тонких" тіл, а при нагріванні деталей під термічну обробку - до "масивних" тіл. При охолодженні поняття про "тонке" й "масивному" тілі залишаються тими самими.

В даній роботі розглядається нагрівання "тонких" тіл. Диференціальне рівняння, що відображає процес нагрівання "тонких" тіл має вид:

$$q \cdot F \cdot d\tau = M \cdot c \cdot dt \quad (7.2)$$

де q - щільність теплового потоку на поверхню тіла, що нагрівається, Вт/м²;

F - ефективна теплоприймаюча поверхня, m^2 ;
 M - маса тіла, що нагрівається, kg ;
 τ - час нагрівання, s ;
 C - теплоємність матеріалу, з якого виготовлене тіло,
 t - температура тіла, що нагрівається, $^{\circ}C$.

Для теплового потоку справедливе вираження:

$$q = \alpha (t_{\text{печ}} - t) \quad (7.3)$$

де $t_{\text{печ}}$ - температура печі, $^{\circ}C$.

Підставивши рівняння 7.3 в 7.2, розділивши змінні, проінтегрувавши і підставивши межі, одержимо рівняння, яке одержав Б.В.Старк:

$$\tau = \frac{M \cdot C}{F \cdot \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_H}{t_{\text{печ}} - t_K} = \frac{V \cdot \rho \cdot C}{F \cdot \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_H}{t_{\text{печ}} - t_K} \quad (7.4)$$

де t_H й t_K - відповідно початкова й кінцева температури тіла, що нагрівається, $^{\circ}C$;

V - об'єм тіла, що нагрівається, m^3 ;

ρ - щільність матеріалу, з якого виготовлено нагріване тіло, kg/m^3 ;

C - середня теплоємність матеріалу в інтервалі температур від t_H до t_K ,

Рівняння 8.4 показує, що час нагрівання або охолодження тіл прямо пропорційно визначальному розміру тіла V/F ; теплоємності C , логарифму відношення початкової й кінцевої різниці температур між середовищем і тілом, що нагрівають, і обернено пропорційно коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням і конвекцією.

Потенціюючи рівняння 8.4, після перетворень одержуємо рівняння для визначення температури тіла:

$$t_K = t_{\text{печ}} - (t_{\text{печ}} - t_H) e^{-\frac{\alpha \cdot F \cdot \tau}{V \cdot C \cdot \rho}} \quad (7.5)$$

або в критеріальному виді:

$$\frac{t_{\text{печ}} - t_K}{t_{\text{печ}} - t_H} = e^{-k \cdot Bl \cdot Fo} \quad (7.6)$$

де k - коефіцієнт форми тіла, що залежить від відношення об'єму тіла до його поверхні (для пластини $k = 1$; для циліндра $k = 2$; для кулі $k=3$);

$Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{C \cdot \rho}$ критерій Фур'є,

$\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ коефіцієнт температуропровідності, m/s .

Якщо теплообмін відбувається за законом випромінювання, то після перетворень одержуємо:

$$\tau = \frac{V \cdot \rho \cdot c}{F \cdot C_n} \cdot \frac{100}{2 \left(\frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^3} \left[\operatorname{arctg} \frac{T_{\text{ж}}}{T_{\text{печ}}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{печ}}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\ln \frac{T_{\text{печ}} + T_{\text{ж}}}{T_{\text{печ}} - T_{\text{ж}}} - \ln \frac{T_{\text{печ}} + T_{\text{н}}}{T_{\text{печ}} - T_{\text{н}}} \right) \right] \quad (7.7)$$

де C_n - наведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²К⁴);

Для високотемпературних печей вираження 7.4 є більше точним, чим 7.7. Ці вираження отримані в припущенні, що $t_{\text{н}} = \text{const}$.

Якщо температура печі змінюється за лінійним законом $t_{\text{печ}} = t_{\text{н.печ}} + \beta \tau$, то температура тіла дорівнює:

$$t = t_{\text{н.печ}} + \beta \cdot \tau - \beta \cdot \frac{1}{h} - \left(t_{\text{н.печ}} - t_{\text{н}} - \beta \cdot \frac{1}{h} \right) e^{-h\tau} \quad (7.8)$$

де $t_{\text{н.печ}}$ - початкова температура печі, °С;

β - швидкість підвищення температури печі, °С/с.

До теплофізичних властивостей матеріалу, що визначають процес нагрівання й охолодження, відносять: коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, ентальпія, щільність, коефіцієнт температуропровідності й коефіцієнт акумуляції тепла.

7.3. Опис лабораторної установки

Зразок 2 (рис.7.1) нагрівається в електропечі опору СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9. Температура в робочому просторі електропечі опору 1 підтримується постійною за допомогою автоматичного регулятора температури 3. В отвори зразка вмонтовані термопари 6 для виміру температури поверхні й центра за допомогою потенціометра 5. Термопари підключається до потенціометра за допомогою перемикача 7.

7.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

Заданий для дослідження зразок зважується й вимірюються його розміри. Потім у наявні в зразку отвори вмонтовуються термопари ХА для виміру температури його поверхні й центра, У попередньо розігріту піч опору завантажуються зразок. Фіксуються час завантаження зразка й температури електропечі опору, поверхні й центра зразка. Перші 8 вимірів температури печі, поверхні й центра зразка виробляються через 30 с, а потім інтервал часу вимірів збільшується до 60 с. Результати вимірів температури заносяться в табл.7.1.

Нагрівання зразка відбувається до моменту часу досягнення різниці температур між поверхнею й центром зразка 20°С:

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = 20^\circ \quad (8.9)$$

де Δt - різниця температур між поверхнею й центром зразка, що нагрівається, °С;

$t_{\text{пов}}$ - температура поверхні зразка, °С;

$t_{\text{ц}}$ - температура центра зразка, °С.

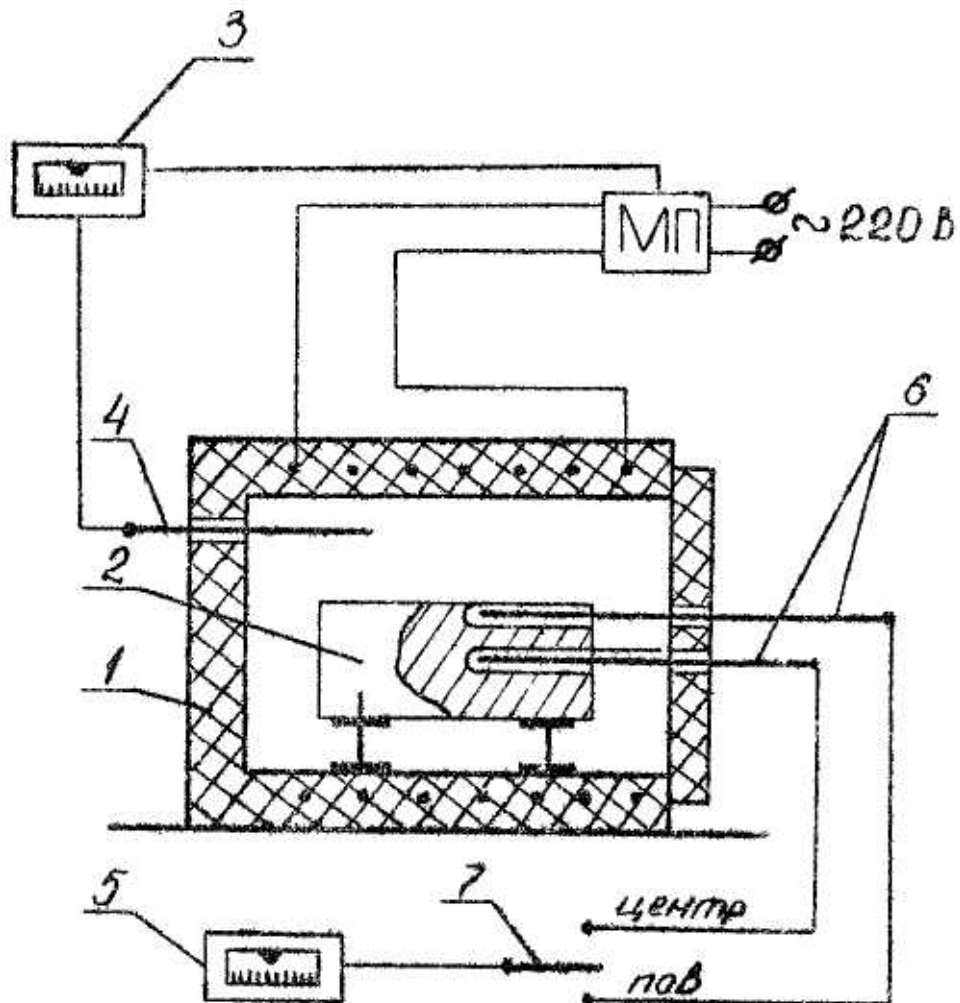


Рисунок 7.1 Установка для дослідження нагрівання "тонких" тіл:

1- електропіч опору СНОЛ-1,6*2,0,0,8/9; 2- досліджуваний зразок; 3,5 - потенціометри; 4,6 - термопари ХА; 7 - перемикач.

Після нагрівання до заданого перепаду температур Δt зразок вивантажується з печі й відбувається його охолодження на повітрі до моменту часу досягнення температури поверхні $t_{\text{пов}} \leq 40$ °С.

По заданим викладачем значенням часу нагрівання й охолодження робляться розрахунки температури нагрівання й охолодження зразка.

Кількість тепла, одержана при нагріванні або відана при охолодженні зразком, дорівнює:

$$Q = M(c_2 \cdot t_k - c_1 \cdot t_n) \quad (8.10)$$

де Q - кількість тепла, Дж;

M - маса зразка, кг;

t_H - початкова температура при нагріванні й кінцевій температурі при охолодженні зразка, °C;

t_K - кінцева температура при нагріванні й початковій температурі при охолодженні зразка, °C;

C_1 й C_2 - теплоємність матеріалу зразка відповідно при t_H й t_K .

Таблиця 7.1 Результати дослідження нагрівання зразка

Час від початку дослідів, с	Температура печі, °C	Температура поверхні зразка, °C	Температура центра зразка, °C
0			
30			
60			
90			
120			

Таблиця 7.2 Результати дослідження охолодження зразка

Час від початку дослідів, с	Температура печі, °C	Температура поверхні зразка, °C	Температура центра зразка, °C
0			
30			
60			
90			
120			

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі α за час нагрівання зразка τ визначається по формулі 7.11:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \tau (t_{\text{печ}} - t_{\text{ср}})} \quad (7.11)$$

де τ - час нагрівання, с;

$t_{\text{ср}}$ - середня температура поверхні зразка, що нагрівається, °C.

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі α за час охолодження зразка $t_{\text{ох}}$ визначається за формулою 8.12:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot t_{ок} \cdot (t_{ср} - t_{ок})} \quad (7.12)$$

де $t_{ср}$ - середня температура поверхні охолоджуваного зразка, °С;
 $t_{ок}$ - температура навколишнього середовища (повітря), °С.

Середня температура що нагріває або охолоджуваного зразка шределяється по формулі 8.13:

$$t_{ср} = \varphi(t_k - t_n) + t_n \quad (7.13)$$

де φ - коефіцієнт, значення якого залежать від співвідношення кінцевої температури тіла й температури нагріваючого середовища.

Таблиця 7.3 Значення коефіцієнта φ

$\frac{t_k}{t_{печ}}$	0,8	0,85	0,9	0,95	0,98
φ	0,62	0,64	0,67	0,71	0,75

Таблиця 7.4 Коефіцієнт теплопровідності деяких матеріалів

Матеріал	Густи- на кг/м ³	Температура, °С							
		0	50	100	150	200	250	300	400
Вуглеце- ва сталь	7830	51,9	51,5	51,0	49,9	48,5	46,5	44,4	42,7
Латунь	8500	105,8	108,3	111,2	114,8	117,5	119,7	121,1	127,9
Дюралю- міній	2600	159,2	160,9	170,6	167,0	193,3	199,2	204,7	216,3

Таблиця 7.5 Теплоємність деяких матеріалів, Дж/(кг·°С)

Матеріал	Температура, °С							
	0	50	100	150	200	250	300	400
Вуглеце- ва сталь	468,1	474,6	484,8	493,2	501,6	509,9	518,4	539,2
Латунь	372,4	378,6	384,6	392,3	401,6	410,7	418,3	427,1
Дюралюміній	889,5	904,2	912,4	925,0	936,6	945,5	954,4	979,5

Підстановка відомих величин у формулу нагрівання "тонких" тіл 7.4 дозволяє одержати розрахункову криву нагрівання або охолодження зразка. Розрахункова крива нагрівання зразка виходить з рішення рівняння 7.5, а розрахункова крива охолодження - рішенням рівняння 7.14:

$$t_k = (t_n - t_{ок}) e^{-\frac{\alpha \cdot F \cdot \tau}{V \cdot c \cdot \rho}} + t_{ок} \quad (7.14)$$

де t_n - температура початку охолодження зразка, °С.

Матеріал, з якого виготовлений зразок, і температура нагрівання вказуються викладачем.

По отриманим експериментальним і розрахунковим даним будуються графіки залежності нагрівання й охолодження зразка від часу.

8. Лабораторна робота № 8

НАГРІВАННЯ Й ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНО "МАСИВНИХ" ТІЛ

8.1. Мета роботи

Дослідити нагрівання й охолодження теплотехнічно й геометрично "масивних" тіл, виготовлених з різних матеріалів. Зробити порівняння зміни температурного поля в часі при нагріванні й охолодженні тіла, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом.

8.2. Загальні відомості про нагрівання "масивних" тіл

Нестационарний тепловий потік завжди пов'язаний з нагріванням й охолодженням тіл. Основний закон розподілу тепла в тілах при цьому виражається диференціальним рівнянням теплопровідності (рівнянням Фур'є):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (8.1)$$

де τ - час нагрівання, с;

t - температура тіла в точці с координатами в момент часу, °С;

$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ -кофіцієнт температуропровідності, м²/с;

λ - кофіцієнт теплопровідності, Вт/(м*К);

c - середня теплоємність матеріалу, Дж/(кг*К) ;

ρ - плотность материала, из которого изготовлено тело, кг/м³.

У випадку нагрівання або охолодження тіла, коли його температурне поле змінюється лише в напрямку однієї просторової координати, рівняння 8.1 значно спрощується й для пластини має наступне значення

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (8.2)$$

а для нескінченно довгого циліндра

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (8.3)$$

де r - змінний радіус, м

Для рішення цих рівнянь необхідно знати геометричну форму й розміри тіла, граничні й початкові умови його нагрівання або охолодження.

Початкові умови відповідають значенню температурного поля тіла в початковий момент часу нагрівання або охолодження. Граничні умови визначають характер теплових взаємодій тіла з навколишнім середовищем, тобто визначають закон теплопередачі на поверхню тіла.

При граничних умовах першого роду задається зміна температури тіла в часі на весь період нагрівання:

$$t_{\text{пов}} = f(\tau) \quad (8.4)$$

При граничних умовах іншого роду задається зміна щільності теплового потоку на поверхні тіла, що нагрівається або охолоджується, в часі на весь період нагрівання:

$$\text{де } \frac{\Delta t}{\Delta n} \quad q_{\text{пов}} = f(\tau) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (8.5)$$

- температурний градієнт на поверхні тіла.

При граничних умовах третього роду задається температура навколишнього середовища й закон теплової взаємодії між середовищем і поверхнею тіла, що нагрівається або охолоджується. Звичайно нагрівання або охолодження тіл здійснюється за рахунок спільної теплопередачі конвекцією й випромінюванням. Для спрощення закон теплової взаємодії між навколишнім середовищем і поверхнею тіла залежно від температури навколишнього середовища може бути зведений до рівнянь, що виражають закон конвекції або закон випромінювання.

При відомості теплообміну між тілом і навколишнім середовищем до закону конвекції одержуємо:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_{n+k}(t_0 - t_{\text{пов}})$$
$$\alpha_{n+k} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right]}{t_0 - t_{\text{пов}}} \quad (8.6)$$

де α_{n+k} - сумарний коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням і конвекцією, Вт/(м²*К);

t_0 - температура навколишнього середовища, °С;

$t_{\text{пов}}$ - температура поверхності тіла, °С;

$C_{\text{пр}}$ - приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²*К⁴).

При відомості теплообміну між навколишнім середовищем і тілом до закону випромінювання одержуємо

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = (C_n + \varepsilon \cdot C_0) \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \quad (8.7)$$

де C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²*К⁴).

При граничних умовах четвертого роду розглядається теплообмін системи твердих тіл, що стикаються один з одним по контактних поверхнях. При ідеальному тепловому контакті температура дотичних поверхонь об'єктів однакова, а теплові потоки рівні.

Фур'є дав рішення диференціального рівняння теплопровідності для випадку, коли теплообмін поверхні тіла з навколишнім середовищем визначається формулою Ньютона:

$$q = \alpha (t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}}) \quad (8.8)$$

при цьому температура печі ($t_{\text{печ}}$) і коефіцієнт тепловіддачі приймаються постійними, а тіло в початковий момент має всюди однакову температуру $t_{\text{н}} = \text{const}$. Тепловий потік q , переданий поверхні тіла, поширюється усередину тіла за законом Био-Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (8.9)$$

Прирівнюючи тепловий потік від печі до поверхні тіла тепловому потоку від його поверхні всередину тіла, одержимо математичне формулювання граничного рівняння:

$$\alpha (t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (8.10)$$

Система рівнянь цілком однозначно визначає процес нагрівання, У даному випадку температурне поле тіла залежить від восьми змінних і констант:

$$t = f(x, \tau, \alpha, \lambda, \alpha, t_{\text{печ}}, t_{\text{н}}, S) \quad (8.11)$$

Побудова розрахункових графіків для знаходження температури залежно від такого числа змінних практично нездійсненно.

З розвитком теорії подібності стало можливим представити рівняння Фур'є в критеріальній формі, користуючись другою теоремою подібності й скоротивши при цьому число змінних з восьми до трьох безрозмірних величин:

$$\theta = f(Bi, F_0, \frac{x}{S}) \quad (8.12)$$

де θ - температурний критерій;

Bi - критерій Био;

F_0 - критерій Фур'є;

S - характерний розмір тіла, м.

У вираженні критерію Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} \quad (8.13)$$

чисельник являє собою "внутрішній" тепловий опір тіла, а знаменник - "зовнішній" тепловий опір на границі тіло - середовище. Зі зростанням теплового опору S/λ , і при підвищенні коефіцієнта α значення критерію Био зростає, збільшується перепад температур по перетині тіла.

Якщо тіло, що нагрівається, має циліндричну форму й довжину, що перевищує в кілька разів його діаметр (не менш, ніж в 4 рази), те можна вважати,

що тепло надходить у тіло тільки через бічну поверхню й передачею тепла через торці можна зневажати. Такий зразок можна вважати "нескінченно довгим" циліндром. Зміна температури "нескінченно довгого" циліндра у часі описується диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (8.14)$$

де t - температура в точці, що знаходиться від осі циліндра на відстані x (м), у момент часу τ (с), С.

При розрахунках нагрівання тіл у промислових печах з постійною температурою печі ($T_{\text{печ}}$) зручно використати рішення диференціального рівняння Фур'є для граничних умов третього роду: при $X=R$:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{\text{печ}} - t_{\text{нов}}) \quad (8.15)$$

де R - радіус циліндра, м;

α - коефіцієнт тепловіддачі від середини до поверхні тіла, Вт/(м²*К).

Найбільш простий вид мають рішення диференціального рівняння (8.10), виражене в критеріальній формі (8.8). Для спрощення й прискорення розрахунків у нашому випадку доцільно використати номограми Л.В.Будрина, побудовані для поверхні ($X/R=1$) і центра ($X/R=0$) циліндра або пластини.

8.3. Опис лабораторної установки

Досліджуваний зразок 2 (рис.8.1), виконаний у вигляді циліндра ($d=40$ мм, $l=210$ мм), завантажується в електропіч опору І, температура якої вимірюється хромельалюмелевою термопарою 4. Температура печі регулюється потенціометром 3. У центрі й на поверхні досліджуваного зразка зашпаровуються робочі спаї хромельалюмелевих термопар 4, температура зразка вимірюється за допомогою потенціометра 5.

8.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

Перед початком роботи необхідно одержати у викладача відомості про матеріал зразка, що нагрівається, й значення температури печі $t_{\text{печ}}$.

Нагрівання здійснюється в середовищі з постійною температурою печі. Вона встановлюється на $30\sim 40^\circ\text{C}$ вище заданого значення, тому що при зануренні в піч холодного зразка температура трохи знижується. Переконавшись у сталості температури печі, завантажують зразок із вмонтованими в нього термопарами. За допомогою автоматичного регулятора температура печі встановлюється на вказану величину. Після уведення зразка в піч, через кожні 60 с. фіксується час нагрівання, температура печі, температура поверхні й центра зразка. Нагрівання зразка робиться до моменту часу досягнення різниці температур між його поверхнею й центром $\leq 30^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_{\text{ц}} = t_{\text{нов}} - t_{\text{ц}} \leq 30^\circ \quad (8.16)$$

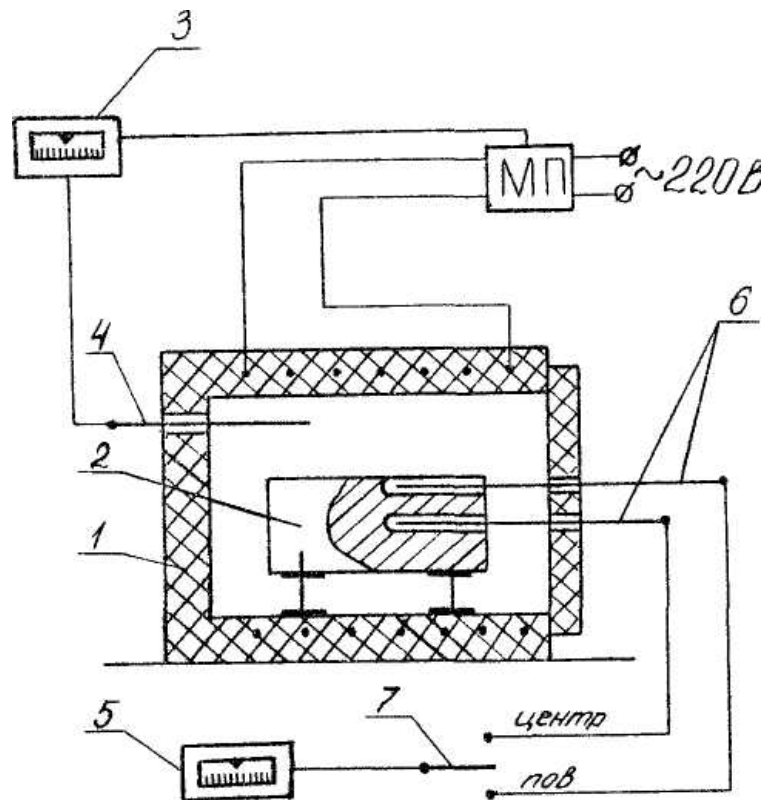


Рисунок 8.1 Схема лабораторної установки:

1- електропіч опору СНОЛ-1,7-2,45-0,9/9, 2- досліджуваний зразок, 3 - регулюючий потенціометр, 4 - термопара для виміру температури печі, 5 - потенціометр, 6 - термопари для виміру температури зразка, 7 - перемикач.

Після нагрівання зразка до заданого значення різниці температур, його виймають із печі охолоджують на повітрі, роблячи виміри температури центра й поверхні через кожні 60 с. Проохолоджувати зразок необхідно стільки часу, скільки тривало його нагрівання.

Результати виміру температури заносяться в табл.9.1 і табл.9.2.

За результатами дослідження нагрівання й охолодження зразка будуються графіки залежності $t_{пов}=f(\tau)$, $t_{ц}=f(\tau)$. Потім для деяких значень температури поверхні зразка $t_{пов}$, заданих викладачем, робиться розрахункове визначення температури $t_{ц}$. Розрахунок робиться в наступній послідовності. Визначається температурний критерій поверхні досліджуваного зразка:

$$\theta_{пов} = \frac{t_{печ} - t_{пов.к}}{t_{печ} - t_{пов.н}} \quad (8.17)$$

де $t_{печ}$ - температура печі, °С;

$t_{пов}$ - температура поверхні зразка в момент початку його нагрівання, °С;

$t_{пов.к}$ - задана температура поверхні зразка, °С.

Визначається значення критерію Фур'є для заданого часу нагрівання

$$F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{S^2} \quad (8.18)$$

де $\alpha = \frac{\lambda}{c * \rho}$ коефіцієнт температуропроводности, м²/с;

t - час нагрівання, с;

$S = \mu \cdot \delta$ - характерний розмір зразка, м;

μ - коефіцієнт несиметричності нагрівання (при двостороннім нагріванні $\mu = 0,5$, при односторонньому нагріванні $\mu = 1,0$);

δ - товщина зразка, що нагрівається, м.

Таблиця 8.1 Зміна температури зразка при нагріванні

Час нагрівання, с	0	60	120	180	240
Температура печі, $t_{печ}, ^\circ C$					
Температура по- верхні зразка $t_{пов}, ^\circ C$					
Температура центра зразка $t_{ц}, ^\circ C$					

Таблиця 8.2 Зміна температури зразка при охолодженні

Время охлаждения, с	0	60	120	180	240
Температура в лабо- раторії $t_0, ^\circ C$					
Температура по- верхні зразка $t_{пов}, ^\circ C$					
Температура центра зразка $t_{ц}, ^\circ C$					

У цьому випадку $S=R$, де R - радіус зразка, м. Необхідні для розрахунку коефіцієнта температуропроводності значення теплофізических властивостей матеріалів наведені в табл.9.3.

Таблиця 8.3 Теплофізичні властивості матеріалів зразків

Матеріал	Щільність $\rho, \text{кг/м}^3$	Коефіцієнт теплопро- відності $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{к)}$	Теплоємність $C,$ $\text{Дж/(кг}\cdot\text{к)}$
Шамот	1900	$0,7 + 0,64 \cdot \frac{t_{cp}}{1000}$	$808 + 314 \cdot \frac{t_{cp}}{1000}$
Магнезит	2700	$4,31 - 0,512 \cdot \frac{t_{cp}}{1000}$	$1017 + 335 \cdot \frac{t_{cp}}{1000}$

Середнє значення температури t_{cp} для визначення коефіцієнта теплопровідності λ і теплоємності C із табл.9.3 розраховується :

$$t_{cp} = \frac{t_{пов.к} + t_{пов.н}}{2} \quad (8.19)$$

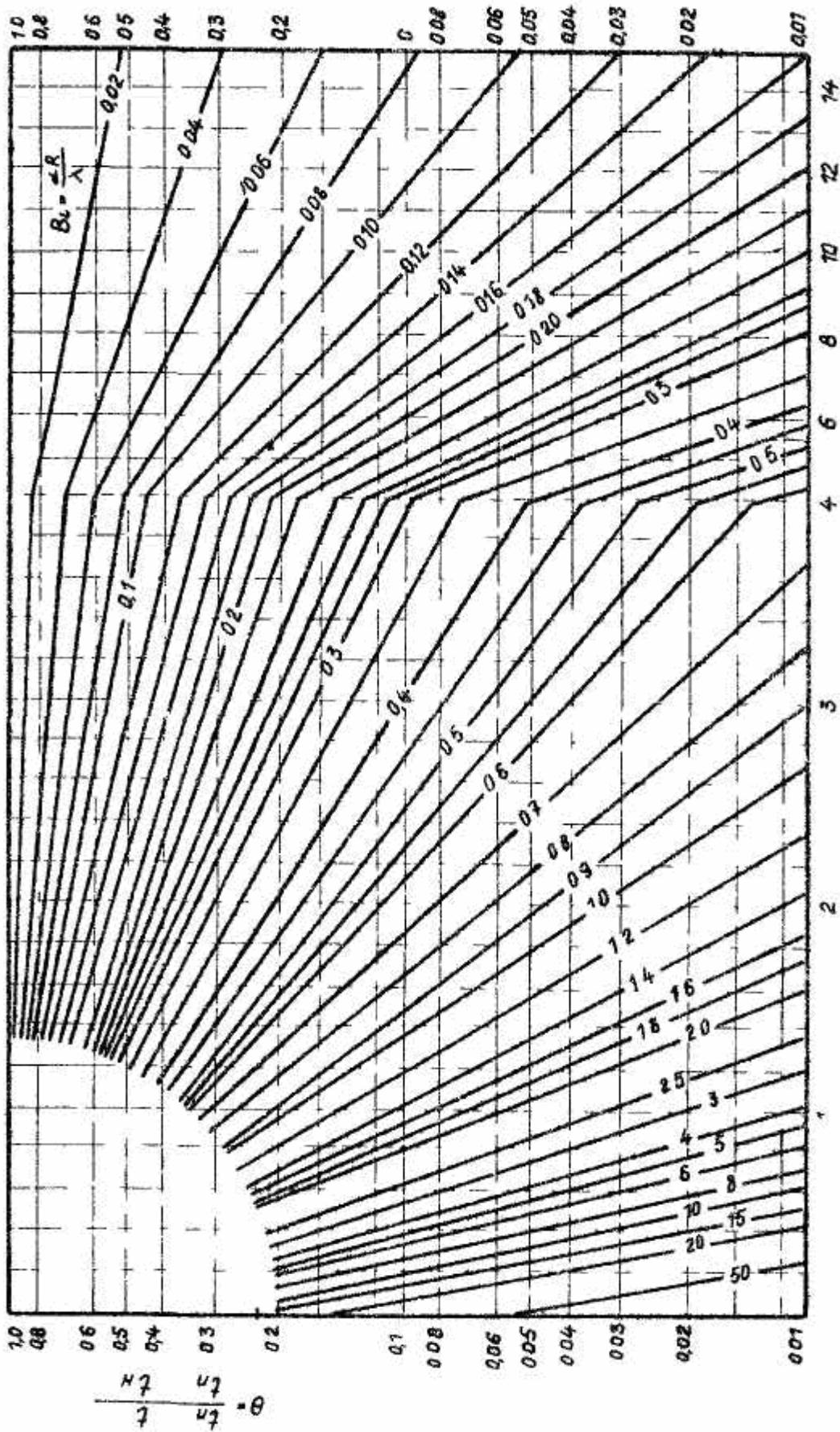
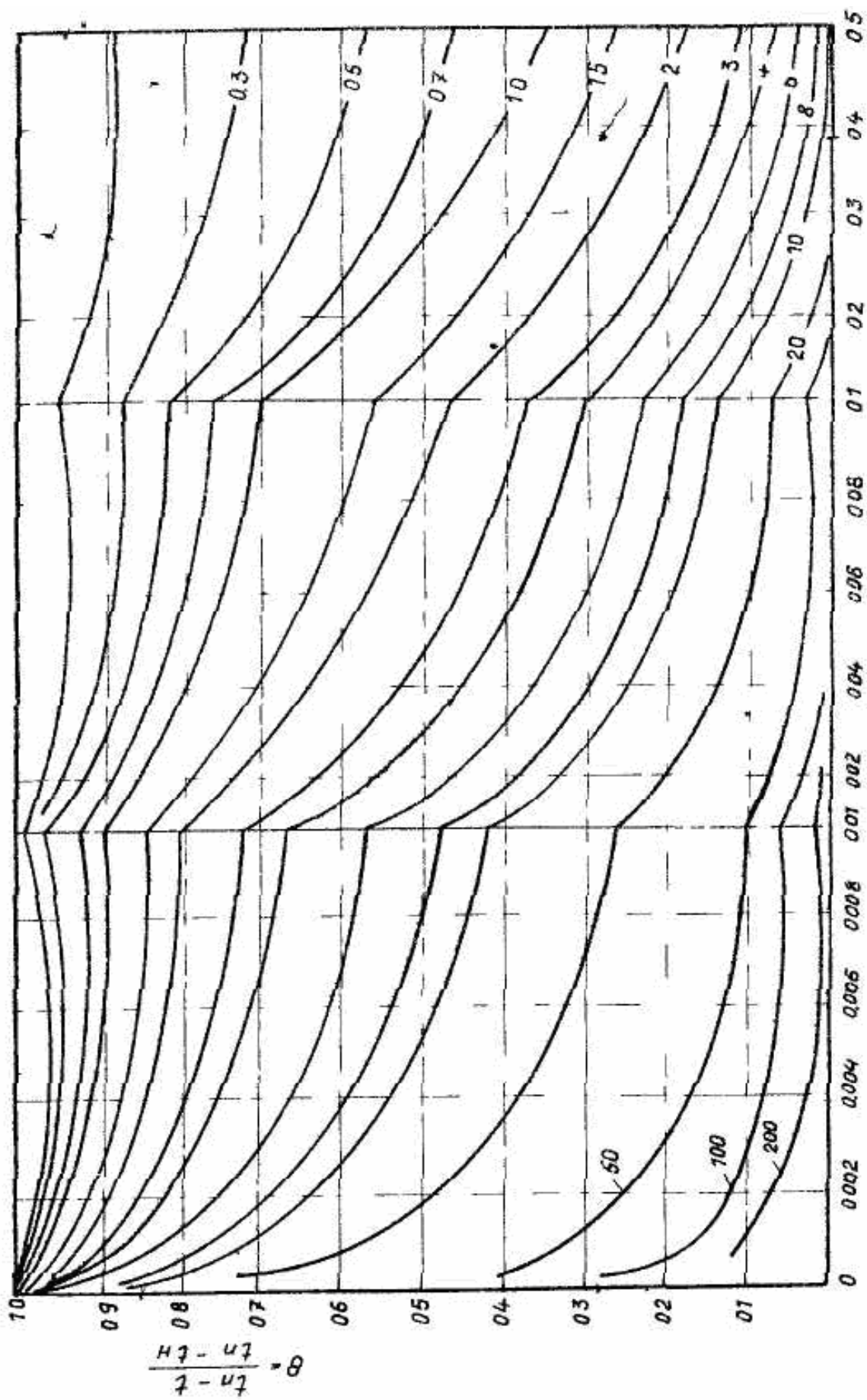


Рисунок 8.2

Ноіограма для розрахунку нагрівання чи охолодження поверхні циліндра



$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$$

Рисунок 8.3
 Ноюграмма для розрахунку нагрівання чи охолодження поверхні циліндра
 при малих значеннях критерія Фурьє

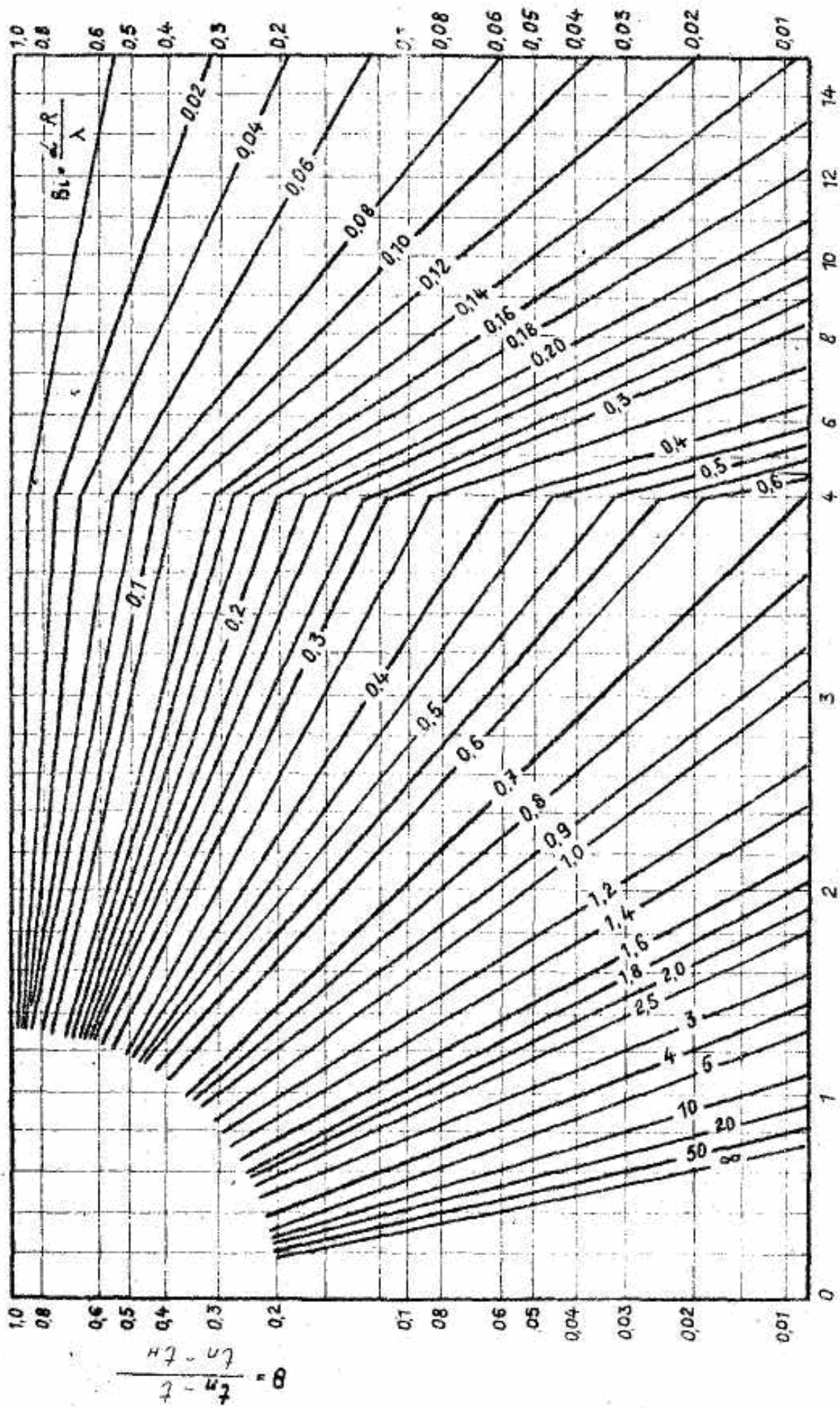
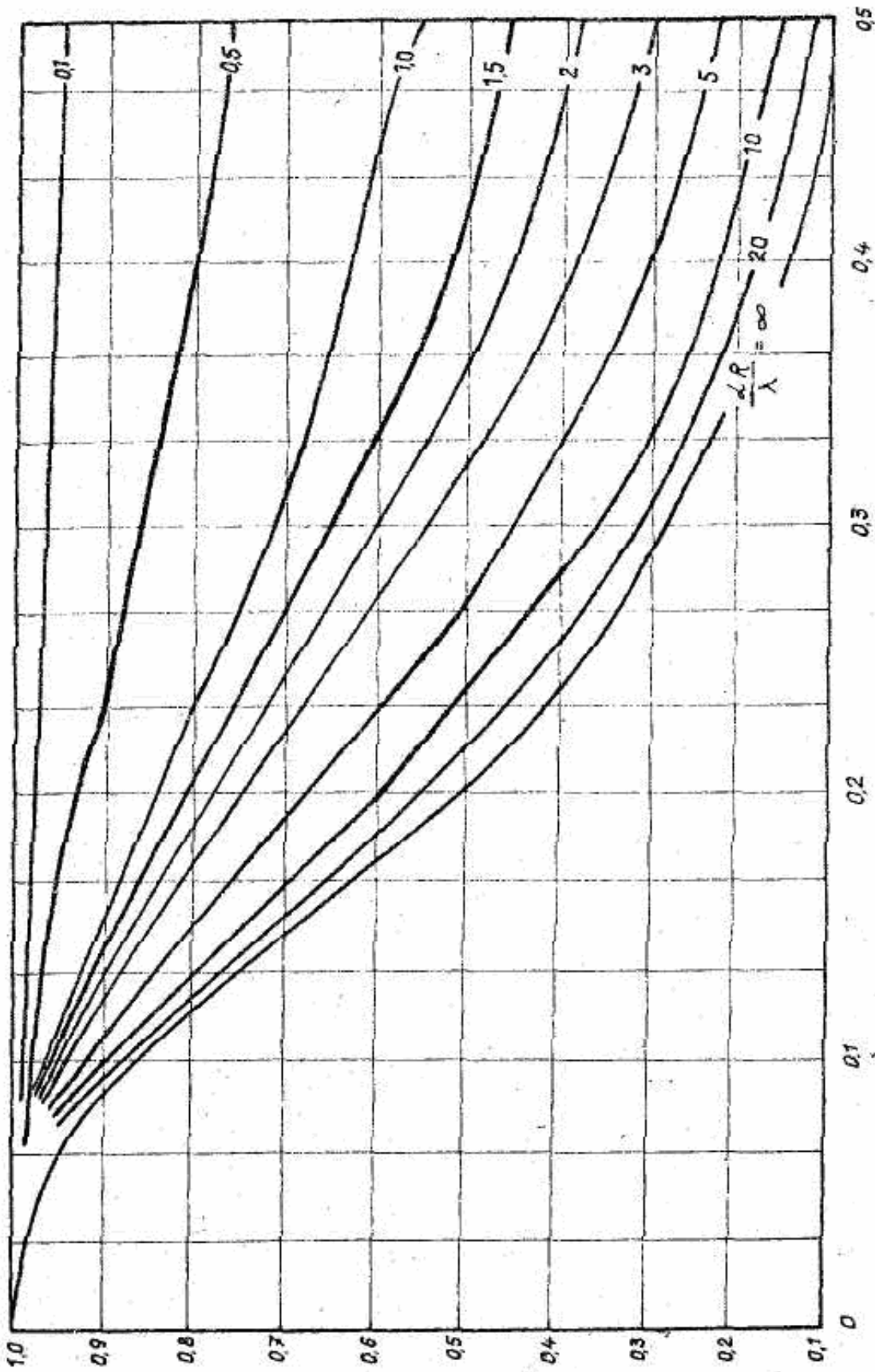


Рисунок 8.4
 Ноіограма для розрахунку нагрівання чи охолодження центра циліндра



$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$$

Рисунок 8.5
 Ноіограма для розрахунку нагрівання чи охолодження центра циліндра
 при малих значеннях критерія Фур'є

$$\theta = \frac{t_n - t}{t_n - t_0}$$

За розрахованим значенням критерію $Q_{\text{пов}}$ і критерію F_0 по номограмі Д.В.Будрина для поверхні циліндра (рис.8.2 і рис. 8.3) визначається критерій $Ві$. Потім по номограмі Д.В.Будрина для центра циліндра (рис.8.4 і рис.8.5) за розрахованим значенням критерію F_0 і знайденому значенню критерію $Ві$ визначається температурний критерій центра зразка $Q_{\text{ц}}$, по якому розраховується температура центра зразка $t_{\text{ц}}$:

$$t_{\text{ц.к}} = t_{\text{печ}} - \theta_{\text{ц}}(t_{\text{печ}} - t_{\text{ц.н}}) \quad (8.20)$$

де $t_{\text{ц.н}}$ - температура центра зразка в момент початку його нагрівання, °С.

Отримані розрахункові значення температури центра зразка зіставляються з експериментальними, визначається погрішність, будується графік залежності розрахункової температури центра зразка від часу нагрівання.

Аналогічні розрахунки роблять для охолодження зразка. Температурний критерій поверхні охолоджуваного зразка розраховується з рівняння 9.21:

$$\theta_{\text{ц}} = \frac{t_0 - t_{\text{пов.к}}}{t_0 - t_{\text{пов.н}}} \quad (8.21)$$

де t_0 - температура повітря в лабораторії, °С;

$t_{\text{пов.н}}$ - температура поверхні охолоджуваного зразка в момент початку його охолодження, °С;

$t_{\text{пов.к}}$ - задана температура поверхні охолоджуваного зразка, °С.

9. Лабораторна робота № 9

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЕЛЕКТРОПЕЧІ ОПОРУ

9.1. Мета роботи

За експериментальними даними скласти тепловий баланс електропечі опору СНОЛ-1,7.2,2-0,9/9. Зробити аналіз статей надходження й витрати тепла в робочому просторі печі.

9.2. Загальні відомості про тепловий баланс печей:

Тепловий баланс печі складається з ряду статей приходу й витрати тепла, які необхідно розрахувати, щоб визначити потрібну кількість теплоносія (палива або електроенергії). Для складання теплового балансу повинні бути відомі конструкція й продуктивність печі, вид теплоносія, технологічні процеси, здійснювані в печі. Тепловому балансу плавильної печі передують розрахунок матеріального балансу плавки.

Тепловий баланс являє собою окремий випадок закону збереження енергії. Всі величини, що входять у рівняння теплового балансу, беруться в границях робочого простору печі за той самий проміжок часу. Такими проміжками часу є:

для печей періодичної дії - тривалість операції теплової обробки технологічних матеріалів τ , для печей безперервної дії - одиниця часу нагрівання. Для паливних печей періодичної дії рівняння теплового балансу має вигляд, кДж:

$$V(Q_H^p + q_T + q_B)\tau = \Delta Q_1 + V(q_2 + q_3 + q_4)\tau + Q_5 + Q_6 \quad (9.1)$$

Для електричних печей періодичної дії рівняння теплового балансу має вигляд, кДж:

$$3,6 \cdot P \cdot \tau = \Delta Q_1 + Q_5 + Q_6 \quad (9.2)$$

Для паливних печей безперервної дії рівняння теплового балансу має вигляд, Вт:

$$1000 \cdot V(Q_H^p + q_T + q_B) = 1000[\Delta q_1 + V(q_2 + q_3 + q_4) + q_5] \quad (9.3)$$

Для електричних печей безперервної дії рівняння теплового балансу має вигляд, Вт:

$$P = 1000[\Delta q_1 + q_5] \quad (9.4)$$

де P - потужність у печі, Вт;

V - витрата палива, кг/с або м³/с;

τ - час нагрівання, с;

Q_H^p - низька теплота згоряння палива;

q_T - фізичне тепло, внесене одиницею маси або обсягу палива, що спалюється;

q_B - фізичне тепло, внесене повітрям, що витрачається для спалювання одиниці маси або обсягу палива;

ΔQ_1 та Δq_1 , - узяті за операцію й за одиницю часу нагрівання різниці кількостей тепла, що втримуються в матеріалі, що нагрівається, при виході з печі й при вході в неї (в останнє включено тепло, що виділяється або поглинається матеріалом у процесі теплової обробки) ;

q_2 ; q_3 ; q_4 - втрати тепла, що доводяться на одиницю палива, обумовленні змістом фізичного тепла у продуктах горіння, що відходять з робочого простору, а також хімічним і механічним недожогом палива;

Q_5 та q_5 - тепло, що віддається в зовнішні середовище побічними теплоприймачами у самій печі за операцію й за одиницю часу нагрівання;

Q_6 - тепло, акумулюєме печними стінками при періодичній роботі печі,

У статтю Q_5 теплового балансу входять: втрати тепла внаслідок теплопровідності печних стінок; втрати тепла випромінюванням через отвори в печних стінках; втрати тепла на нагрівання середовища, охолодження конструкції печі, втрати тепла на нагрівання захисної атмосфери; втрати тепла на нагрівання пристосувань для розміщення в печі матеріалу, що нагрівається, і всеможливого технологічного оснащення, транспортуючих пристроїв, що виходять до робочого простору й знову входять у нього.

При складанні теплового балансу, крім аналізу співвідношення величин окремих статей балансу, визначаються наступні головні теплотехнічні показники: коефіцієнт корисної дії печі, питома витрата тепла, коефіцієнт використання тепла, коефіцієнт використання палива й питома витрата умовного

палива.

9.3. Опис лабораторної установки

Установка (рис.9.1) складається з однофазної муфельної електропечі опору I, призначеної для нагрівання зразків 2,

Муфельна електропіч опору СНОЛ-1,7-2,6.0,9/9, тепловий баланс якої необхідно скласти, розрахована на роботу від напруги мережі 220 в й оснащена терморегулятором, що забезпечує автоматичне регулювання температури печі в діапазоні 100-1000°C.

Піч складається з корпусу, виготовленого з листової сталі, усередині якого поміщений шамотний муфель із нагрівальним елементом. Внутрішні розміри робочого простору муфеля: довжина -260 мм, висота - 90 мм, ширина - 170 мм. Простір між муфелем і корпусом заповнено теплоізоляційним матеріалом. Муфель закривається дверкою з вкладиша з шамоту. Через торцеву стінку печі встановлюється хромель-алюмелева термопара 3, призначена для виміру температури печі.

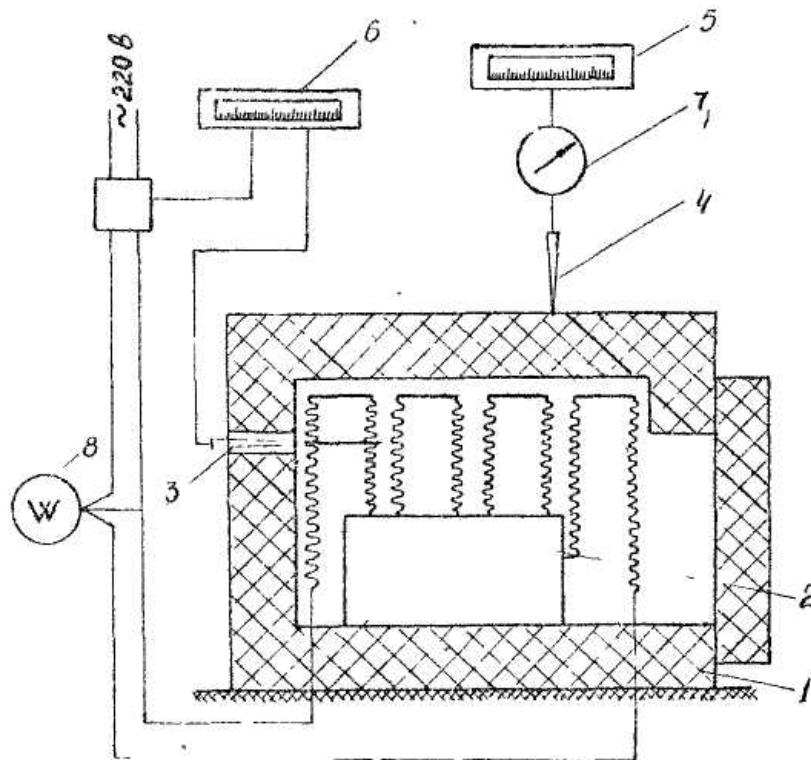


Рисунок 9.1 Схема лабораторної установки:

1- електропіч опору СНОЛ-1,7-2,6.0,9/9, 2- зразки, що нагрівають, 3 - термопара для виміру температури печі, 4 - термометри для виміру температури зовнішніх поверхонь стінок і дверки печі; 5,6 - потенціометри, 7 - перемикач, 8 - однофазний лічильник

Для визначення кількості споживаною пічкою електроенергії в ланцюг включений електричний лічильник 8.

Зразки завантажуються в піч через завантажувальне вікно. Кінцева температура

нагрівання зразків виміряється оптичним пірометром ОППІР-09.

Для виміру температури зовнішньої поверхні стін на них змонтовані термопари 5. Схема монтажу термопар на перемикачі показана на рис.9.2. Площа зовнішньої поверхні печі дорівнює: своду - 0,172 м², поду - 0,171 м², лівої сторони - 0,142 м², правої сторони - 0,142 м², дверцята - 0,0345 м², торцевих стінок -0,246 м². Відкрите вікно займає площу - 0,0167 м².

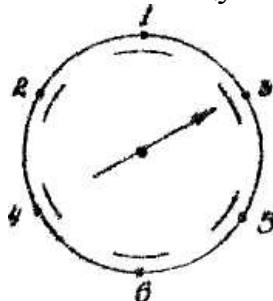


Рисунок 9.2 Схема монтажу термопар на перемикачі:

1 - права бічна стінка, 2 - ліва бічна стінка, 3 - торцева стінка, 4 - свод, 5 - під, 6 - дверка.

9.4. Порядок виконання роботи й проведення розрахунків

У розігріту до 920-980°C піч завантажуються попередньо взважені зразки, У момент вагураки зразків фіксується: час початку досліду, початкове показання лічильника; час відкриття дверки, починаючи з моменту завантаження металу. Після загрузки металу дверка закривається й починається фіксація температури печі й поверхні кожуха печі з інтервалом в 5 хв (до кінця нагрівання зразків). По досягненні температури печі 900°C дверка печі відкривається й за допомогою оптичного пірометра виміряється температура поверхні зразків.

Одночасно з виміром температури зразків записується час і показання лічильника. на цьому дослід закінчується. У момемент виміру температури поверхні зразків фіксується час, протягом якого робоче вікно залишається відкритим (до моменту закінчення досліду). Час відкриття вікна виміряється за допомогою секундоміра. Після досліду зразки прохолоджуються у воді, очищаються від окалини й взважуються. Дані досліду заносять у табл. 9.1, 9.2 й 9.3.

Після закінчення досліду складається рівняння теплового балансу печі:

$$Q_{1-1} + Q_{1-2} = Q_{2-1} + Q_{2-2} + Q_{2-3} + Q_{2-4} \quad (9.5)$$

де Q_{1-1} - тепло,що виділяється в нагрівальних елементах печі при проходженні струму, кДж;

Q_{1-2} - тепло екзотермічних реакцій, кДж;

Q_{2-1} - витрата тепла на нагрівання зразків, кДж;

Q_{2-2} - втрати тепла випромінюванням через робоче вікно печі, кДж;

Q_{2-3} - втрати тепла через кладку печі в навколишнє середовище, кДж;

Q_{2-4} – невраховані витрати тепла, кДж.

Тепло, виділюване в нагрівальних елементах печі при проходженні

електричного струму, розраховується з рівняння 10.6:

Таблиця 9.1 Температура печі, поверхні стін та дверки

Час від початку дослідів	Температура печі °C	Температура поверхні стін та дверки , °C				
		Ліва	Права	Свод	Під	Торцева Дверка
0						
5						
10						
15						

Таблиця 9.2 Результати дослідів

Маса зразків		Час початку	Час кінця	Данні лічильника до початку дослідів	Данні лічильника після дослідів
до початку	після дослідів	τ_1, c	τ_2, c	$P_1, кВт-ч$	$P_2, кВт-ч$
$M_1, кг$	$M_2, кг$				

Таблиця 9.3 Результати дослідів

Температура зразків до нагрівання	Температура зразків після нагрівання	Час відкриття дверки		Температура повітря в лабораторії
		під час загрузки	під час виміру температури	
$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	τ_3, c	τ_4, c	$t_B, ^\circ C$

$$Q_{11} = 3,6 \cdot P \cdot 10^3 \quad (9.6)$$

де $P = P_2 - P_1$ - витрата електроенергії, кВт-ч.

Тепло, виділюване при окислюванні металу, розраховується з рівняння 10.7:

$$Q_{12} = 5652 \alpha \quad (9.7)$$

де $\alpha = M_1 - M_2$ - вигар металу за період нагрівання, кг,

M_1 - маса зразків до дослідів, кг, M_2 - маса зразків після дослідів, кг.

Витрата тепла на нагрівання зразків розраховується з рівняння 10.8:

$$Q_{2,1} = M_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad (9.8)$$

де t_1 та t_2 - відповідно початкова і кінцева температура зразків, які нагрівають, °С;

c - середня теплоємність матеріалу зразків в інтервалі температур t_1 та t_2 , кДж/(кг*К).

Теплоємність матеріалу визначається по табл.9.4,

Таблиця 9.4 Середня теплоємність сталей і чавуну в інтервалі температур від 20°С до 1000 °С, кДж/(кг*К):

Матеріал	Температура, °С									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Сірий чугун	0,376	0,460	0,493	0,507	0,516	0,534	0,586	0,628	0,668	0,603
Вуглецева сталь	0,493	0,507	0,516	0,541	0,554	0,580	0,618	0,671	0,695	0,691
Ньзколегована сталь 30Х	0,493	0,516	0,554	0,618	0,678	0,787	0,836	0,621	0,621	0,621

Втрати тепла випромінюванням через відкритий отвір печі розраховується з рівняння 9.9:

$$Q_{2,2} = 20,5 \cdot \left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 \cdot F_0 \cdot \varphi \cdot \tau_b \quad (9.9)$$

де $T_{\text{печ}}$ - температура печі, °С;

φ - коефіцієнт діафрагмування, що визначається по графіком або таблицям залежно від форми й розмірів вікна й товщини стінки. Для даної печі він дорівнює 0,43;

F_0 - площа робочого вікна печі, м²:

$F_0 = 0,0167$ м²;

$\tau_b = \tau_3 + \tau_4$ - загальний час огкрытия дверки печі за час досліду, ч.

Втрати тепла через кладку печі в навколишнє її середовище розраховуються як сума втрат через бічні й торцеві стінки, свод, під та закриту дверцю:

$$Q_{2,3} = Q_{c-b} + Q_{c-t} + Q_{c-s} + Q_p + Q_d \quad (9.10)$$

Кожна із цих втрат тепла розраховується з рівняння 9.11:

$$Q_i = 3,6 \cdot \alpha_i \cdot (t_{\text{ср}i} - t_b) \cdot F_i \cdot \tau = 3,6 \cdot q_i \cdot F_i \cdot \tau \quad (9.11)$$

де α_i - сумарний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні стінки і навколишнє середовище (повітря), Вт/(м² К);

q_i - щільність теплового потоку від поверхності стінки у навколишнє середовище (повітря), Вт/м²;

F_i - зовнішня поверхня стінки і, м²;

$t_{срi}$ - середня температура поверхні стінки i , °C;

$t_{в}$ - температура повітря навколо печі, °C;

τ - час досліду, ч.

Значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі α_i та щільності теплового потоку q_i визначається по табл. 10.5.

Таблиця 9.5 Значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі α_i та щільності теплового потоку в залежності від температури зовнішньої поверхні стінки печі

Температура наружньої поверхні, °C	Щільність теплового потоку q , Вт/м ²	Коефіцієнт тепловіддачі α_i , Вт/(м ² ·К)
25	43	8,8
30	96	9,6
40	212	10,5
50	343	11,4
60	487	12,1
70	641	12,8
80	807	13,3
90	984	14,0
100	1170	14,6
120	1575	15,8
140	2013	16,8
160	2517	18,0
180	3085	19,3
200	3677	20,4
250	5417	23,6

Результати розрахунку теплового балансу заносяться до таблиці 9.6.

Таблиця 9.6 Тепловий баланс печі

Статті теплового балансу	Кдж	%
Приход:		
1. Електрична енергія		
2. Тепло екзотермічних реакцій		
Усього		
Витрати:		
1. На нагрівання зразків		
2. Витрати через кладку печі		
3. Витрати випромінюванням через відкрите вікно		
4. Невраховані витрати		
Усього		

Рівняння теплового балансу при проектуванні печей слугує для визначення витрати енергії. При випробуваннях печей рівняння теплового балансу використовується для аналізу втрат тепла й виявлення шляхів поліпшення використання енергії й роботи печі в цілому.

Розрізняють наступні коефіцієнти корисної дії печі: термічний К.К.Д, коли корисно використане тепло ставиться до всього приходу тепла, і економічний К.К.Д, коли корисно використане тепло ставиться до тепла, яке виділяється при горінні палива, або до витрати електричної енергії.

Коефіцієнти корисної дії печі розраховують із рівняння 10.13 й 10.14

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{Q_{2,1}}{Q_{1,1} + Q_{1,2}} \cdot 100\% \quad (9.13)$$

$$\eta_{\text{екм}} = \frac{Q_{2,1}}{Q_{1,1}} \cdot 100\% \quad (9.14)$$

Література

1. Арутюнов В.А., Миткалинный В.И., Старк С.Б. Металлургическая теплотехника. Под общ. ред. Глинкова М.А.. Том 1. — М.: Metallurgiya, 1974. 672 с., ил.
2. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Metallurgiya, 1977. — 463 с., ил.
3. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Казнен М.Д. и др. - М.: Metallurgiya, 1970. — 528 с., ил.
4. Филимонов Ю.П., Старк С.Б., Морозов В.А. Металлургическая теплотехника. Под общ. ред. Глинкова М.А.. Том 2. — М.: Metallurgiya, 1974. — 520 с., ил.
5. ГОСТ 147—74 Топливо твердое. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания.
6. ГОСТ 2409—80 Материалы и огнеупорные изделия. Метод определения водопоглощения, кажущейся плотности, открытой и общей пористости.