

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

**ПРОГРАМА, МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА  
КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ  
З КУРСУ «ТЕПЛОМАСООБМІН»**

**для студентів спеціальності 7.090505  
усіх форм навчання**

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 3 від 03.12.08.

Харків НТУ «ХПІ» 2009

Програма, методичні вказівки та контрольні завдання з курсу «Тепломасообмін» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли і реактори» усіх форм навчання / Уклад.: Гончаренко Л.В., Тютюнник Л.І., Гончаренко О.Л. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 48 с.

Укладачі: Л. В. Гончаренко  
Л. І. Тютюнник  
О.Л. Гончаренко

Рецензент В.Я. Горбатенко

Кафедра парогенераторобудування

## Загальні методичні вказівки

Тепломасообмін є однією з основних базових теоретичних дисциплін в процесі підготовки інженерів-теплоенергетиків. Знання, уміння і навички, набуті при вивченні цієї дисципліни, інтенсивно використовуються в спеціальних дисциплінах, в курсовому і дипломному проектуванні. Не дивлячись на те, що тепломасообмін є загальноосвітньою дисципліною, методологічно навчальна програма її тісно пов'язана зі спеціальністю «Котли і реактори», оскільки в ній велика увага приділена специфічним питанням теплообміну, характерним для котельних агрегатів, реакторів і парогенераторів ТЕС і АЕС. Наприклад, в навчальній програмі врахована та обставина, що в топках котлів переважаючим є променевий теплообмін.

Метою вивчення дисципліни є надбання знань на рівні відтворення в об'ємі навчальної програми, умінь і навичок виконання теплових розрахунків, проведення експериментальних досліджень і обробки їх результатів.

Завданням вивчення дисципліни є оволодіння закономірностями протікання основних процесів перенесення теплоти і маси в елементах енергетичних установок, засвоєння основних результатів теоретичних і експериментальних досліджень і ознайомлення з шляхами вирішення проблем теплообміну з урахуванням сучасних науково-технічних досягнень.

Відповідно до навчального плану дисципліна «Тепломасообмін» вивчається студентами на 3 курсі в V і VI семестрах. У кожному семестрі читаються установчі лекції, проводяться лабораторні роботи і після виконання двох контрольних робіт здійснюється здача заліків і іспитів. Навчальним планом також передбачено виконання курсової роботи на тему: «Тепловий розрахунок пароохолодника котла» в VI семестрі.

Для плідного вивчення дисципліни необхідно володіти знаннями з вищої математики, фізики, гідрогазодинаміки, технічної термодинаміки.

При вивченні дисципліни «Тепломасообмін» студентам слід звернути увагу на самостійну роботу з навчальною літературою, список якої наведений нижче. При цьому вивчення необхідно вести систематично і послідовно в строгій відповідності з навчальною програмою, стисло конспектуючи основні теоретичні положення. При вивченні розділу за підручником рекомендується перш за все досягнути фізичний сенс процесів тепломасообміну, ознайомитись зі специфічними визначеннями, поняттями, позначеннями і лише після цього приступати до засвоєння методів математичного опису процесів теплообміну до повного їх відтворення по пам'яті без допомоги підручника. Особливу увагу слід звернути на розмірності величин, які входять до формул, оскільки перевірка правильності перетворення розмірностей є одним із способів контролю за ходом математичних операцій і отриманням кінцевого результату. При цьому необхідно користуватись системою одиниць вимірювання СІ.

Оцінку якості вивчення теоретичного матеріалу слід здійснювати за кількістю правильних відповідей на наведені в кінці розділу питання для самоперевірки. Форма відповідей може бути короткою: «так», «ні», «не знаю» або мати аргументоване обґрунтування. У разі виникнення утруднень з відповідями або невпевненості в їх правильності слід звернутися до пояснень, наведених в основній і додатковій літературі або за письмовою чи усною консультацією до викладача.

Після вивчення теоретичного матеріалу можна приступити до виконання контрольної роботи за відповідним розділом. Планомірне і послідовне вивчення теорії і рішення задач контрольних робіт є основним етапом підготовки до іспитів. Виконання контрольних робіт може бути здійснене із залученням комп'ютерної техніки шляхом самостійної розробки алгоритмів і програм або з використанням програм, наведених у літературі.

Основними вимогами до іспитів є знання теорії і розуміння фізичної суті процесів теплообміну, уміння вирішувати практичні задачі і аналізувати отримані результати.

## **Список літератури**

### **Основна:**

1. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – 4-е изд. – М.: Энергия, 1981. – 466с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева – М. : Энергия, 1977. – 341 с.
3. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел – 4-е изд. – М.: Энергия, 1980. – 264 с.

### **Додаткова:**

4. Беляев Н.М. Основы теплопередачи: учебник / – К., Вища шк. Головное изд.-во, 1989. – 343 с.
5. Леонтьев А.И. Теория тепломассообмена. – М.: Высш. шк., 1979. – 496 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

## **1. Навчальна програма і методичні вказівки**

### **1.1. Вступ. Основні положення теорії теплопровідності**

#### ***Програма:***

Загальні поняття про процеси передачі теплоти і маси. Історія розвитку теорії тепломасообміну. Внесок вітчизняних і зарубіжних вчених.

Сучасні проблеми. Роль тепломасообміну в створенні високоєфективних котельних агрегатів, реакторів і парогенераторів АЕС.

Елементарні види теплообміну: теплопровідність, конвективний теплообмін, променевий теплообмін. Температурне поле, ізотермічні поверхні, температурний градієнт, лінії теплового току, тепловий потік. Закон Фур'є, щільність теплового потоку, коефіцієнт теплопровідності. Механізм передачі теплоти в газоподібних, рідких, твердих, пористих, металевих тілах. Коефіцієнти теплопровідності цих тіл.

Диференційне рівняння теплопровідності. Умови однозначності рішення диференційного рівняння теплопровідності. Закон Ньютона-Ріхмана. Тепловіддача і теплопередача.

### ***Методичні вказівки:***

В процесі вивчення цієї теми необхідно звернути увагу на роль і місце теплообміну в області природних, технічних наук і, зокрема, в області котло- і реакторобудування. Допомогу в цьому надасть ознайомлення з історичними етапами розвитку теплотехніки.

Слід засвоїти, що тепломасообмін є мимовільним незворотним процесом розповсюдження теплоти і маси в просторі. Теплообмін пов'язаний з обміном теплотою між нерівномірно нагрітими тілами, їх частинами, теплоносіями, тілами і теплоносіями. Перенесення теплоти здійснюється трьома елементарними способами: теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням. Масообмін - це процес розповсюдження маси речовини в просторі. Кожний з цих процесів може протікати як самостійно, так і у взаємодії.

Результатом вивчення цієї теми є отримання уявлень про закономірності передачі теплоти одним з трьох елементарних видів теплообміну - теплопровідністю. Необхідно розібратися у фізичній суті закону Фур'є і таких основних понять, пов'язаних з ним, як температурне поле, температурний градієнт, тепловий потік, щільність теплового потоку, коефіцієнт теплопровідності. Звернути увагу на одиниці вимірювання основних параметрів, що характеризують теплопровідність. Слід мати уявлення про величину коефіцієнта теплопровідності різних тіл: газоподібних, рідких, металів, будівельних матеріалів.

Необхідно звернути увагу на те, що виведення диференційного рівняння теплопровідності базується на законі збереження енергії і законі теплопровідності Фур'є за умови постійності значення коефіцієнта теплопровідності. Слід врахувати, що диференційне рівняння охоплює незліченну безліч процесів теплопровідності. Тому для конкретизації задачі до диференційного рівняння необхідно приєднати умови однозначності (красві умови): геометричні, фізичні, граничні, початкові.

***Література:*** [1, с. 5–6, гл. 1, п. 1,1–1,7]; [2, с. 4–12, 44–46].

### ***Питання для самоперевірки:***

1. Які роль і значущість теорії тепломасообміну в рішенні науково-технічних задач, що стоять перед теплоенергетикою?
2. Які механізми переносу теплоти (енергії) в елементарних процесах теплообміну? Які відмінні особливості цих процесів?
3. Чи можливий конвективний теплообмін в твердому тілі?
4. Які механізми переносу теплоти в процесі теплопередачі? Чи є теплопередача одним з елементарних видів теплообміну?
5. У чому відмінність сталого (стаціонарного) від несталого (нестационарного) теплових режимів і, відповідно, температурних полів?
6. Чи можуть перетинатися ізотермічні поверхні?
7. Чи достатньо знати градієнт температур для визначення різниці температур між двома точками температурного поля?
8. Який напрямок має вектор градієнта температур по відношенню до ізотермічної поверхні?
9. Чи позитивна величина градієнта температур у напрямі зниження температури?
10. Чи однакові розмірності теплового потоку і щільності теплового потоку?
11. Що характеризують лінії теплового потоку?
12. Чому закон Фур'є має знак «мінус» в правій його частині?
13. Який фізичний сенс коефіцієнта теплопровідності?
14. Чому пористі матеріали мають низьке значення коефіцієнта теплопровідності?
15. Чому вологі будівельні матеріали мають вище значення коефіцієнта теплопровідності в порівнянні з аналогічними коефіцієнтами сухого будівельного матеріалу і води?
16. Який закон покладений в основу виведення диференційного рівняння теплопровідності?
17. Які допущення прийняті при виведенні диференційного рівняння теплопровідності?
18. Який фізичний сенс коефіцієнта теплопровідності?
19. Для чого потрібні умови однозначності?
20. Чи тотожні поняття «умови однозначності», «краєві умови», «граничні умови»?
21. Які способи завдання граничних умов, необхідних для вирішення задач теплопровідності?
22. Який фізичний сенс коефіцієнта тепловіддачі, який входить до рівняння Ньютона–Ріхмана?
23. Як формулюється диференційне рівняння тепловіддачі (граничні умови третього роду)?

24. Чи можна вирішити конкретну задачу за допомогою диференційного рівняння теплопровідності за відсутності умов однозначності?

## 1.2. Теплопровідність при стаціонарному тепловому режимі

### *Програма:*

Передача теплоти через одношарову і багатошарову плоскі стінки за граничних умов I і III родів. Визначення закону розподілу температури в стінці (температурне поле) і кількості переданої теплоти при постійному і змінному коефіцієнті теплопровідності. Термічні опори і коефіцієнт теплопередачі. Передача теплоти через одношарову і багатошарову циліндричні стінки за граничних умов I і III родів. Лінійний коефіцієнт теплопередачі, щільність теплового потоку, термічні опори. Критичний діаметр циліндричної стінки. Теплова ізоляція. Рациональність вибору матеріалу теплової ізоляції. Передача теплоти через кульову стінку. Теплопередача через складні стінки: з ребрами і з прошарками. Інтенсифікація процесів теплопередачі.

### *Методичні вказівки:*

Теплопровідність в різних безперервно діючих теплообмінних апаратах при тривалих незмінних температурах внутрішнього і зовнішнього середовищ практично не залежить від часу, тобто в цьому випадку процес передачі теплоти є стаціонарним. Тому краєві задачі стаціонарної теплопровідності за граничних умов I і III родів мають велике практичне значення.

У цій темі розглядаються одновимірні стаціонарні задачі для тіл простої геометричної форми – плоскої, циліндричної і кульової стінок. Оскільки в цьому випадку температура є функцією тільки однієї координати, то її розподіл температури в полі описується одновимірним стаціонарним диференціальним рівнянням теплопровідності в сукупності з відповідними граничними умовами. При цьому, якщо внутрішні джерела теплоти відсутні ( $q_v = 0$ ), то диференціальне рівняння теплопровідності залежно від системи координат (прямокутна, циліндрична, сферична) істотно спрощується.

$$\text{Для плоскої стінки: } \frac{d^2 t}{dx^2} = 0;$$

$$\text{для циліндричної стінки: } \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0;$$

$$\text{для кульової стінки: } \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} = 0.$$

Слід зазначити, що внутрішні джерела теплоти мають місце тоді, коли усередині тіл протікають процеси з виділенням або поглинанням теплоти. Такі випадки характерні при об'ємному виділенні теплоти в тепловиділяючих елементах ядерних реакторів за рахунок ділення ядер атомного палива, при виділенні теплоти за рахунок проходження електричного струму в провідниках, при виділенні або поглинанні теплоти за рахунок хімічних реакцій і т.п. Приблизно можна вважати, що в топці котла є внутрішні джерела теплоти. Проте, у зв'язку з тим, що в топці котла переважним є променевий теплообмін, ними можна нехтувати.

У даній темі теплопровідність з внутрішніми джерелами теплоти не розглядається. Надалі, в курсі «Теплообмін в ядерних енергетичних установках» це буде надолужено.

В процесі вивчення теми необхідно навчитися інтегрувати диференційні рівняння теплопровідності за граничних умов I і III родів, твердо засвоїти такі поняття як загальний і окремі термічні опори, коефіцієнти тепловіддачі і теплопередачі, відмінності в характері зміни температури в плоскій, циліндричній і кульовій стінках, щільність теплового потоку і тепловий потік, що проходять крізь стінку.

Слід звернути увагу на той факт, що при врахуванні залежності коефіцієнта теплопровідності від температури диференційне рівняння теплопровідності непридатне і виведення рівняння зміни температури в тілі базується безпосередньо на законі Фур'є за умови постійності щільності теплового потоку.

На основі аналізу характеру зміни окремих термічних опорів за радіусом циліндричної стінки слід переконатися в тому, що при критичному її діаметрі загальний термічний опір теплопередачі має мінімальну величину. Теплова ізоляція, яка нанесена на трубопровід, у зв'язку з цим виконуватиме своє призначення тільки в тому випадку, якщо її внутрішній діаметр буде більший критичного. Тобто необхідно підібрати такий ізоляційний матеріал, щоб ця умова дотримувалась.

При розгляді питань інтенсифікації процесу теплопередачі звернути увагу на два принципово відмінних способи, а саме: за рахунок збільшення коефіцієнтів тепловіддачі і за рахунок збільшення поверхонь. Відповідно до першого способу необхідно збільшувати менший з коефіцієнтів тепловіддачі. При цьому коефіцієнт теплопередачі збільшується до тих пір, поки обидва коефіцієнти тепловіддачі не порівнюються, після цього збільшення коефіцієнта теплопередачі можливе за рахунок підвищення значення будь-якого з них. Проте слід пам'ятати, що збільшення коефіцієнта тепловіддачі за рахунок підвищення швидкості руху теплоносія приводить до зростання аеродинамічного опору теплообмінного апарату.

Другий спосіб інтенсифікації теплопередачі заснований на тому факті, що термічний опір плоскої стінки визначається тільки коефіцієнтом тепловіддачі, циліндричної стінки - коефіцієнтом тепловіддачі і діаметром,



кульової стінки – коефіцієнтом тепловіддачі і діаметром в квадраті. Звідси витікає, що термічний опір тепловіддачі можна зменшити шляхом збільшення поверхні теплообміну за рахунок її оребрення. При цьому ребра слід розміщувати зі сторони меншого значення коефіцієнта тепловіддачі до тих пір, поки обидва термічні опори не порівнюються. Слід звернути увагу на те, що коефіцієнти тепловіддачі при установці ребер не збільшуються і основним його призначенням є прагнення до створення компактних теплообмінних апаратів.

***Література:*** [1, гл., п. 2,1–2,6]; [2, гл. 1, п. 1,2–1,4; п. 6,1–6,5].

***Питання для самоперевірки:***

1. Чи справедливе твердження, що при стаціонарному режимі теплопровідності і постійному значенні щільності теплового потоку температурний напір в плоскій однорідній стінці прямо пропорційний її термічному опору?
2. Чому в плоскій однорідній стінці температура змінюється за лінійним законом?
3. Як зміниться характер розподілу температури в однорідній плоскій стінці, якщо коефіцієнт теплопровідності із зростанням температури: збільшиться, зменшиться, не зміниться?
4. Чи незмінна щільність теплового потоку за товщиною багат шарових плоских стінок при стаціонарному режимі теплопровідності і відсутності внутрішніх джерел теплоти?
5. З якою метою введено еквівалентний коефіцієнт теплопровідності багат шарової плоскої стінки? Від яких параметрів він залежить?
6. Як зв'язані градієнти температур в окремих шарах багат шарової плоскої стінки з їх коефіцієнтами теплопровідності?
7. Як визначити графічним способом температури на межах шарів багат шарової плоскої стінки за граничних умов I роду?
8. Як визначити графічним способом температури на поверхні одношарової плоскої стінки за граничних умов III роду?
9. Чому в циліндричній і кульовій стінках температура змінюється за криволінійним законом?
10. Чи однакові розмірності щільності теплового потоку і лінійної щільності теплового потоку циліндричної стінки?
11. Чи вірно, що термічний опір теплопередачі плоскої стінки залежить тільки від коефіцієнта тепловіддачі, а циліндричної і кульової ні?
12. Чи можна визначити критичний діаметр циліндричної стінки без урахування умов теплообміну її зовнішньої поверхні з навколишнім середовищем?
13. У яких випадках втрати теплоти через циліндричну теплову ізоляцію можуть зростати внаслідок збільшення її товщини при незмінних

значеннях температури на внутрішньому її діаметрі, температури навколишнього середовища і коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні до навколишнього середовища?

14. З якого боку теплообмінної поверхні необхідно збільшувати коефіцієнт тепловіддачі? Чому?

15. Який висновок можна зробити при порівнянні термічних опорів теплопровідності одношарових плоскої, циліндричної і кульової стінок за граничних умов III роду?

16. У якому випадку термічним опором теплопровідності стінки нехтувати не можна?

17. З якою метою застосовується оребрення поверхні теплообміну? Що таке коефіцієнт оребрення?

18. З якого боку поверхні теплообміну необхідно застосовувати оребрення? Чому?

19. Як здійснюється розрахунок передачі теплоти через газовий або рідинний прошарок?

### **1.3. Основні положення теорії конвективного теплообміну**

#### ***Програма:***

Поняття і визначення. Види і режими руху рідини. Рівняння Ньютона-Ріхмана, коефіцієнт тепловіддачі. Фізичні властивості рідин (газів). Диференціальні рівняння конвективного теплообміну. Умови однозначності для процесів конвективного теплообміну. Короткі відомості про аналітичні, наближені і експериментальні методи рішення задач конвективного теплообміну. Основи теорії подібності: значення теорії подібності, визначення і теореми. Критерії і критерійні рівняння подібності. Умови подібності процесів конвективного теплообміну. Фізичне і математичне моделювання процесів конвективного теплообміну. Узагальнення дослідних даних на основі теорії подібності.

#### ***Методичні вказівки:***

В процесі вивчення теми необхідно пам'ятати, що при передачі теплоти теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням, які можуть здійснюватися одночасно, Конвективний теплообмін має вирішальне значення. При цьому він є найбільш складним фізичним процесом і, відповідно, найбільш важким в освоєнні.

Основним завданням теорії конвективного теплообміну є отримання залежностей для визначення коефіцієнта тепловіддачі, який на відміну від коефіцієнта теплопровідності не є фізичним параметром тіла, а характеризує теплову взаємодію рухомого теплоносія і твердої поверхні. Ця взаємодія залежить від великої кількості чинників, таких як швидкість руху рідини,

температур поверхні нагріву і рідини, фізичних властивостей рідини, форми і розмірів поверхні і інших характеристик. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі ускладнюється тим, що перелічені вище параметри взаємопов'язані. Наприклад, в'язкість, щільність, коефіцієнт теплопровідності рідин залежать від температури, швидкість руху рідини, у свою чергу, залежить від в'язкості і т.п. Вимушена конвекція часто супроводжується вільною конвекцією. Тому коефіцієнт тепловіддачі як комплексна характеристика конвективного теплообміну повинен враховувати всі особливості його протікання. У зв'язку з цим необхідно розібратися, перш за все, з фізичною природою процесу конвективного теплообміну, звернути увагу на умови руху рідини (вимушений або вільний, ламінарний або турбулентний режими течії), на умови виникнення і розвитку гідродинамічного і теплового приграничних шарів. Звернути увагу на співвідношення товщини цих шарів залежно від фізичних властивостей рідин, тобто від чисел Прандтля.

Слід з'ясувати, що математичний опис конвективного теплообміну, що складається з системи диференційних рівнянь і умов однозначності, є досить складним. Аналітичне рішення системи диференційних рівнянь у зв'язку з цим в більшості випадків не представляється можливим. Задача може бути вирішена тільки для обмеженого числа простих випадків і то з великою кількістю допущень. Набуття числових значень коефіцієнтів тепловіддачі експериментальним шляхом на натурних об'єктах економічно недоцільно. Виходом з положення є залучення теорії подібності. Вона дає можливість проводити експериментальні дослідження на моделі об'єкту, що значно дешевше, і результати дослідів на моделі поширювати на всі подібні явища, що відбуваються в натурних пристроях. В процесі вивчення розділу рекомендується ознайомитись з трьома теоремами подібності і їх наслідками, з ознаками подібності, з фізичним сенсом основних чисел подібності, які використовуються при рішенні задач конвективного теплообміну. Слід чітко з'ясувати відмінність між визначальними і визначаючими числами подібності. Одним з важливих моментів є умови подібності різних процесів конвективного теплообміну. Необхідно ознайомитись з теорією фізичного і математичного моделювання процесів конвективного теплообміну. Слід звернути увагу на те, що обробка експериментальних даних в критерійній формі дозволяє виявити основні чинники, що істотно впливають на величину коефіцієнта тепловіддачі.

**Література:** [1, гл.4, п.4,1–4,5, гл.5, п.5,1–5,7, гл.6, п.6,1–6,6]; [2, гл.2, п.2,1–2,5].

**Питання для самоперевірки:**

1. Чи можлива конвекція в нерухомих рідинах?
2. Які відмінності між вільною і вимушеною конвекцією?

3. У чому полягає фізичний сенс коефіцієнта тепловіддачі?
4. Чи однакові розмірності коефіцієнтів теплопровідності і тепловіддачі?
5. Чи може вільна конвекція впливати на тепловіддачу в умовах вимушеної конвекції?
6. Від яких чинників істотно залежить коефіцієнт тепловіддачі?
7. У чому полягає фізичний сенс коефіцієнтів в'язкості? Чи однакові розмірності коефіцієнтів динамічної і кінематичної в'язкості?
8. У якому випадку товщини гідродинамічного і теплового приграничних шарів співпадають?
9. Чи є система диференційних рівнянь(енергії, руху, нерозривності, тепловіддачі) системою, що повною мірою характеризує закономірність процесу конвективного теплообміну?
10. Чи достатня система диференційних рівнянь конвективного теплообміну для повного математичного формулювання крайової задачі?
11. Чи однаковий перелік умов однозначності для процесів теплопровідності твердого тіла і конвективного теплообміну?
12. У чому полягає фізичний сенс граничних умов III роду?
13. Які основні положення поняття подібності фізичних явищ є невід'ємною частиною теорії подібності?
14. Чи можуть постійні подібності вибиратись довільно?
15. На базі яких рівнянь виводяться числа подібності Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа, Прандтля?
16. Які числа подібності є визначальними і визначуваними?
17. Який фізичний сенс чисел Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа, Прандтля?
18. Чи співпадають за формою і змістом числа Біо і Нуссельта?
19. Чи міститься однойменна фізична величина в числах Рейнольдса, Нуссельта, Пекле і Грасгофа?
20. Що таке критерійні рівняння? Як їх одержують?
21. Які умови подібності процесів конвективного теплообміну при вимушеному, вільному і вільно-вимушеному рухах теплоносіїв?
22. З якою метою і як здійснюється моделювання процесів конвективного теплообміну?
23. Що являє собою визначальний розмір? Чи може бути обраний як визначальний будь-який лінійний розмір, введений в умови однозначності?
24. Що являє собою визначальна температура? Чи може бути узята в її якості будь-яка температура, введена в умови однозначності?
25. Як здійснюється усереднення по поверхні коефіцієнтів тепловіддачі?
26. Як здійснюється усереднення по поверхні температурного напору?

27. Як здійснюється отримання емпіричних формул для визначення коефіцієнтів тепловіддачі?

#### **1.4. Конвективний теплообмін при вимушеному русі рідини**

##### ***Програма:***

Тепловіддача при подовжньому омиванні плоскої поверхні. Гідродинамічні умови розвитку процесу. Рішення задачі тепловіддачі при ламінарному і турбулентному приграничних шарах. Короткі відомості про теорію приграничного шару. Критерійні рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі.

Тепловіддача при подовжньому русі рідини в трубах. Гідродинамічні умови розвитку процесу. Гідродинамічна і теплова стабілізації процесу. Тепловіддача при ламінарному режимі руху рідини. Взаємний вплив вимушеної і вільної конвекції. Тепловіддача при турбулентному режимі руху рідини. Тепловіддача в зігнутих трубах і каналах не круглого перетину.

Тепловіддача при поперечному омиванні одиночної циліндричної труби. Гідродинамічні умови розвитку процесу. Критерійні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі. Тепловіддача при поперечному омиванні пучків труб. Типи пучків. Гідродинамічні умови розвитку процесу. Критерійні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі в пучках труб.

##### ***Методичні вказівки:***

Вибір плоскої поверхні теплообміну в якості першого об'єкта вивчення тепловіддачі обумовлений простотою теоретичного аналізу процесів, що відбуваються в приграничних шарах. Зокрема, при ламінарному режимі течії вдається встановити співвідношення між товщиною гідродинамічного і теплового приграничних шарів, яке залежить тільки від числа Прандтля, а також отримати без допомоги дослідів критерійне рівняння тепловіддачі з точністю до постійних [1].

Необхідно звернути увагу на роль множника  $(Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}$ , який входить в критерійне рівняння і враховує напрям теплового потоку в умовах змінності фізичних властивостей рідини в приграничному шарі залежно від температурного рівня.

На відміну від плоскої пластини при омиванні криволінійних поверхонь рідиною (як подовжньому, так і поперечному) коефіцієнти і показники степені в критеріальних рівняннях встановлені експериментальним шляхом. При виборі критерійного рівняння необхідно враховувати режим руху рідини, наявність ділянок гідродинамічної і теплової стабілізації потоку, способи завдання визначальної температури, напрямку теплових потоків і т.п.

Основною особливістю зовнішнього поперечного омивання рідиною одинокої труби є відрив ламінарного і турбулентного приграничних шарів в

кормовій її частині за рахунок зростання статичного тиску і гальмування рідини, оскільки швидкість руху тут зменшується. Складний характер обтікання циліндра рідиною обумовлює трудність теоретичного рішення задач для всіх областей омивання, окрім лобової точки, для якої існує теоретичне рішення з визначення локального коефіцієнта тепловіддачі. В зв'язку зі складністю картини течії не простим є і характер зміни коефіцієнта тепловіддачі за колом труби. Слід також звернути увагу на ту обставину, що при поперечному обтіканні інтенсивність теплообміну в шахових пучках вища, ніж в коридорних. При цьому критерійні рівняння відносяться до третього і подальших рядів трубок пучка. Для труб першого ряду обох типів пучків знайдене за допомогою емпіричних рівнянь значення коефіцієнта тепловіддачі необхідно помножити на поправочний коефіцієнт  $\epsilon_\alpha = 0.6$ , для труб другого ряду в коридорних пучках – на  $\epsilon_\alpha = 0.9$ , а в шахових пучках труб – на  $\epsilon_\alpha = 0.7$ .

**Література:** [1, гл.7, п.7,1–7,4; гл.8, п.8,1–8,4; гл.9, п.9,1–9,2]; [2, гл.3, п.3,1, 3,2, 3,4].

**Питання для самоперевірки:**

1. Від яких параметрів залежить зміна товщини приграничного шару із збільшенням відстані від передньої кромки пластини?
2. Чи залежить товщина в'язкого підшару при турбулентній течії від кінематичного коефіцієнта в'язкості?
3. Чи залежать нижній і верхній критичні числа Рейнольдса від ступеня турбулентності набігаючого на пластину потоку?
4. Чи залежить відношення товщини теплового і гідравлічного приграничних шарів при ламінарному режимі течії від фізичних властивостей рідини?
5. При якому режимі течії (ламінарному чи турбулентному) інтенсивність тепловіддачі на пластині вища?
6. Чи однакові значення середніх швидкостей руху рідини в трубі при ламінарному і турбулентному режимах течії?
7. Від яких чинників залежить довжина стабілізаційної ділянки при ламінарному режимі течії рідини в трубі?
8. Чи є відмінності в зміні розподілу швидкості і температури за довжиною труби при подовжньому русі рідини?
9. Чи однакові значення місцевого і середнього коефіцієнтів тепловіддачі на ділянці теплової стабілізації?
10. Як змінюється еюра швидкостей у вертикально розташованій трубі при сумісних вимушеному і вільному рухах рідини?
11. Як впливає на тепловіддачу вільна конвекція при вимушеному русі рідини в горизонтально розташованій трубі?

12. Як впливають на тепловіддачу при турбулентному режимі подовжнього руху рідини в трубі швидкість руху, фізичні властивості рідини і діаметр труби?

13. Чи допускається використовувати критерійні рівняння для течії в круглих трубах в розрахунках тепловіддачі при течії в трубах іншої форми поперечного перетину?

14. Чому в зігнутих трубах збільшується інтенсивність тепловіддачі?

15. Який вплив на тепловіддачу надає шорсткість поверхні труб при ламінарному і турбулентному режимах течії?

16. Які чинники істотно впливають на відрив потоку в кормовій частині поперечно омиваної труби?

17. Чи однакові місцеві коефіцієнти тепловіддачі за колом труби при поперечному його омиванні рідиною?

18. Чим обумовлена наявність мінімуму в епюрі зміни коефіцієнта тепловіддачі за колом поперечної омиваної труби?

19. Чи залежить коефіцієнт тепловіддачі при поперечному омиванні труби від кута атаки?

20. Чи однакові гідродинамічні умови поперечного омивання рідиною коридорних і шахових пучків труб?

21. Чи вірно, що коефіцієнти тепловіддачі для третього і подальших за ходом руху рідини рядів труб в пучку мають вищі значення, ніж для перших двох?

22. Як визначається середній коефіцієнт тепловіддачі для пучка труб?

23. У якому пучку (коридорному чи шаховому) інтенсивність тепловіддачі вища?

## **1.5. Конвективний теплообмін при вільному русі рідини**

### ***Програма:***

Основні положення. Тепловіддача в необмеженому просторі. Ламінарна і турбулентна конвекція уздовж вертикальної поверхні. Вільна конвекція у горизонтальних трубах і плит. Тепловіддача в обмеженому просторі. Характер циркуляції рідини. Розрахункові рівняння.

### ***Методичні вказівки:***

В процесі вивчення теми необхідно з'ясувати, що вільна конвекція виникає в полі дії сил тяжіння, тому важливою характеристикою процесу є розташування поверхні, що обігривається (або охолоджується), в просторі: вертикальне, горизонтальне, похиле, а також форма поверхні: плоска, циліндрична. Облік цих обставин визначає вид критерійного рівняння для розрахунку тепловіддачі.

Слід звернути увагу на той факт, що розрахунок тепловіддачі при вільній конвекції в обмеженому просторі, де приграничні шари, що формуються у суміжних сторін і взаємно впливають один на одного, значно ускладнюється в порівнянні з вільною конвекцією в необмеженому об'ємі. Для полегшення розрахунку процес конвективного теплообміну замінюється процесом теплопровідності шляхом введення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності, що враховує передачу теплоти через обмежений шар як конвекцією, так і теплопровідністю.

**Література:** [1, гл.10, п.10,1–10,3]; [2, гл.3, п.3,3].

**Питання для самоперевірки:**

1. Як змінюється швидкість руху рідини біля нагрітої вертикальної поверхні в необмеженому просторі? За рахунок чого відбувається рух рідини?
2. Як змінюється температура рідини при вільному русі рідини уздовж нагрітої вертикальної поверхні в необмеженому просторі?
3. Чи можлива вільна конвекція в необмеженому просторі біля вертикальної поверхні, починаючи з турбулентного режиму течії?
4. Чи можлива вільна конвекція уздовж вертикальної поверхні без ділянки з турбулентним режимом руху рідини?
5. Як змінюється місцевий коефіцієнт тепловіддачі по висоті стінки або труби в необмеженому об'ємі? Чи залежить він при турбулентному режимі руху рідини від висоти стінки?
6. Які параметри істотно впливають на коефіцієнт тепловіддачі при вільній конвекції в необмеженому просторі?
7. Чому немає циркуляції рідини, якщо нагріта горизонтально розташована поверхня обернена вниз?
8. Що таке коефіцієнт конвекції і чому він є функцією чисел Грасгофа і Прандтля?
9. Чому інтенсивність тепловіддачі в обмеженому об'ємі при збільшенні чисел Грасгофа знижується?
10. Чи залежить від форми прошарку вибір визначального розміру і температури при обчисленні чисел подібності?

## **1.6. Теплообмін при кипінні рідини**

**Програма:**

Загальні уявлення про процес кипіння. Механізм передачі теплоти при кипінні в необмеженому об'ємі: зародження, зростання і відрив парових бульбашок. Залежності щільності теплового потоку від температурного напору при постійній температурі стінки і при постійному тепловому потоці. Перша і друга критичні щільності теплового потоку. Режими кипіння.



Механізм передачі теплоти при бульбашковому кипінні в необмеженому об'ємі. Центри паротворення; мінімальний радіус бульбашки; мінімальна робота утворення бульбашок критичного розміру, вплив змочуваності стінки рідиною; швидкість росту бульбашок; відривний діаметр бульбашки. Вплив недогріву рідини; вплив шорсткості і теплофізичних властивостей стінки. Тепловіддача при бульбашковому кипінні рідини в необмеженому об'ємі: залежність коефіцієнта тепловіддачі від тиску, щільності теплового потоку і температурного напору.

Теплообмін при кипінні рідини в трубах. Розрахунок тепловіддачі при бульбашковому кипінні в умовах вільної і вимушеної конвекції. Кризи кипіння.

Тепловіддача при плівковому кипінні.

### ***Методичні вказівки:***

Вивчення процесів кипіння (і паротворення), особливо в трубах, є важливим етапом в підготовці інженерів спеціальності «Котли і реактори», оскільки ці процеси є основними в енергетичних котлах, котлах-утилізаторах, реакторах і парогенераторах АЕС.

Кипіння може бути поверхневим і об'ємним, бульбашковим і плівковим, в перегрітих рідинах, з недогрівом, в необмеженому просторі і усередині труб, при заданих температурі стінки і щільності теплового потоку, при вільній і вимушеній конвекції.

При кипінні рідини у вертикальній трубі спостерігаються три основні області з різною структурою потоку: область підігріву (економайзерна ділянка), область кипіння (випарна ділянка), область підсихання вологої пари. Випарна ділянка, у свою чергу, включає області емульсійного, пробкового і стрижньового режимів кипіння.

При вивченні кожного з наведених вище процесів і режимів кипіння необхідно розібратися в механізмах процесів, оцінити вплив різних чинників на умови і інтенсивність їх протікання, а також засвоїти методику визначення коефіцієнтів тепловіддачі, щільності теплового потоку або температури стінки. При цьому необхідно звернути увагу на те, що при постійній щільності теплового потоку перехідний режим кипіння існувати не може і має місце стрибкоподібний перехід бульбашкового режиму кипіння в плівковий. Розвиток процесу має кризовий характер, який, як правило, супроводжується руйнуванням поверхні нагріву (пережогом). При зниженні величини щільності теплового потоку після виникнення плівкового режиму кипіння відбувається стрибкоподібний перехід від плівкового до бульбашкового режиму, обминаючи перехідний режим, і виникає нова криза кипіння. Такі кризові явища характерні для електричного обігріву поверхні, в атомному реакторі в результаті ядерної реакції, при променевому теплообміні в топках котлів. Необхідно навчитися визначати критичну щільність

теплого потоку з метою запобігання небезпеки виникнення плівкового режиму кипіння.

**Література:** [1, гл.11, п.13,1–13,9]; [2, гл.4, п.4,1].

**Питання для самоперевірки:**

1. Від яких чинників залежить величина початкового перегріву рідини, необхідного для виникнення кипіння?

2. Яких значень досягають перша критична щільність теплового потоку і температурний напір при кипінні води в атмосферних умовах?

3. Яких значень досягають друга критична щільність теплового потоку і температурний напір при кипінні води в атмосферних умовах?

4. Чи однакові умови переходу від бульбашкового до плівкового режиму кипіння при різних способах підведення теплоти до поверхні:  $t_c = \text{const}$  або  $q_c = \text{const}$  ?

5. Які умови виникнення і існування парової бульбашки?

6. Чи завжди температура киплячої рідини вище за температуру пари в бульбашці?

7. Чому із зменшенням радіусу парової бульбашки тиск усередині підвищується?

8. Від яких чинників істотно залежить мінімальний радіус парової бульбашки?

9. Який вплив на відривний діаметр бульбашки надають змочуваність і поверхневий натяг рідини?

10. Від яких чинників залежить швидкість росту парових бульбашок?

11. Чи збільшується коефіцієнт тепловіддачі при бульбашковому кипінні з підвищенням тиску?

12. Чому критерійні рівняння вигляду  $Nu_{жс} = f(Re_{жс}, Pr_{жс})$  незручні в практичних розрахунках і, як правило, для цієї мети використовуються емпіричні залежності?

13. Яка величина приймається як визначальний розмір при визначенні чисел Рейнольдса і Нуссельта у разі використання критерійного рівняння  $Nu_{жс} = f(Re_{жс}, Pr_{жс})$  ?

14. Що таке масові і об'ємні витратні паровмісти?

15. Як здійснюється розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі при бульбашковому кипінні в трубах в умовах вимушеної конвекції?

16. Що являє собою швидкістю циркуляції?

17. Які чинники істотно впливають на першу критичну щільність теплового потоку  $q_{кр1}$  ?

18. Від яких параметрів залежить величина другої критичної щільності теплового потоку  $q_{кр2}$  ?

19. Чи залежить кризова щільність теплового потоку від швидкості циркуляції?

20. Яка природа кризи другого роду?

21. Як визначаються коефіцієнти тепловіддачі при плівковому режимі кипіння на поверхні горизонтальних і вертикальних труб?

22. Що таке температура граничного перегріву рідини?

## **1.7. Теплообмін при конденсації чистої пари**

### ***Програма:***

Основні уявлення про процес конденсації. Тепловіддача при плівковій конденсації на вертикальній поверхні. Рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі. Вплив різних чинників на тепловіддачу. Тепловіддача при конденсації пари в трубах. Рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі на вертикальних і горизонтальних трубах. Тепловіддача при краплинній конденсації пари.

### ***Методичні вказівки:***

При вивченні теми перш за все слід з'ясувати особливості протікання процесів конденсації в різних умовах: у об'ємі або на поверхні, плівкова або краплинна, при нерухомій або рухомій парі. При плівковій конденсації мають місце ламінарний і змішаний (тобто ламінарний в сукупності з турбулентним) режими руху плівки. При краплинній конденсації розрізняють режими з малим і великим температурними напорами.

Слід звернути увагу на особливість інтерпретації числа Рейнольдса для плівки конденсату, оскільки воно стає визначуваним числом подібності у зв'язку з тим, що містить в собі невідому величину – коефіцієнт тепловіддачі. Це вимагає введення нових визначальних критеріїв.

Необхідно проаналізувати рішення Нуссельта для визначення товщини плівки конденсату і коефіцієнта тепловіддачі при її течії на вертикальній поверхні і горизонтальній трубі, яке, не дивлячись на прийняті спрощення, достатньо вірно відображає основні закономірності процесу конденсації. При розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі враховуються поправки на залежність коефіцієнта кінематичної в'язкості і коефіцієнта теплопровідності конденсату від температури, на вплив хвильового характеру руху плівки. Звернути увагу на істотне зниження інтенсивності теплообміну, якщо в парі є гази, що не конденсуються (наприклад, повітря). Слід розібратися в особливостях процесу конденсації пари усередині труб і на поверхні горизонтальних одиночних труб і пучків труб.

Вивчення теми завершується розглядом процесів краплинної конденсації і методів визначення коефіцієнтів тепловіддачі залежно від тиску пари і температурного напору за допомогою приведеної в [1,2] діаграми.

**Література:** [1, гл.12, п.12,1–12,6]; [2, гл.4 п.4,2].

**Питання для самоперевірки:**

1. Чому коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари знижується із збільшенням товщини плівки?
2. Які допущення прийняв Нуссельт при рішенні задачі визначення коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари?
3. Як враховується зміна теплофізичних властивостей конденсату при визначенні коефіцієнта тепловіддачі?
4. З якими явищами пов'язано збільшення коефіцієнта тепловіддачі за наявності хвильового характеру руху плівки конденсату?
5. При якому значенні числа Рейнольдса хвильовий рух плівки конденсату відсутній?
6. Чи вірно, що поправочний множник на хвильовий рух при плівковому ламінарному режимі конденсації більше одиниці?
7. Чи входить до складу числа Рейнольдса для плівки конденсату коефіцієнт тепловіддачі при конденсації?
8. Чи залежить коефіцієнт тепловіддачі при ламінарному режимі конденсації від температурного напору?
9. Чи може середній коефіцієнт тепловіддачі при плівковому ламінарному режимі конденсації на вертикальній поверхні зменшуватися із збільшенням температурного напору і збереженням розміру ділянки конденсації?
10. Чому за наявності повітря в парі різко знижується коефіцієнт тепловіддачі при конденсації?
11. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари усередині труб?
12. За рахунок яких чинників коефіцієнт тепловіддачі при краплинній конденсації пари більший, ніж при плівковій?

## **1.8. Конвективний тепломасообмін**

**Програма:**

Основні положення теорії масообміну. Термо- і бародифузія. Закон Фіка. Коефіцієнт дифузії. Чинники, що впливають на коефіцієнт дифузії. Конвективний масообмін як сукупність молярного і молекулярного переносу речовини. Щільність потоку маси в процесі конвективного масообміну. Дифузійний приграничний шар. Система диференціальних рівнянь дифузійного приграничного шару. Граничні умови на поверхні розділу фаз. Коефіцієнт масовіддачі. Застосування методів подібності і розмірностей до процесів масообміну. Дифузійні числа Нуссельта і Прандтля. Критерійні рівняння масовіддачі. Аналогія процесів тепло- і масообміну.

### **Методичні вказівки:**

Масообмін - це мимовільний незворотний процес переносу маси компоненту суміші з області з високою його концентрацією в область з меншою концентрацією. Якщо цей процес одночасно супроводжується теплообміном, то такий процес називається тепломасообміном. Тепломасообмін характерний для багатьох теплотехнічних задач, наприклад, при фазових перетвореннях: кипінні, конденсації, випаровуванні, сушці і ін.

В процесі вивчення теми спочатку слід засвоїти основні поняття і закони переносу маси. Процес дифузії супроводжується двома явищами - переносом маси і переносом енергії. Розрізняють дифузію в газоподібних, рідких і твердих тілах, в двокомпонентних (бінарних) середовищах і багатокомпонентних середовищах, масовіддачу через напівпроникну і повністю проникну поверхні, концентраційну дифузію, термо- і бародифузію. При цьому на дифузійний перенос маси часто накладається також конвективний перенос, тобто масообмін здійснюється молекулярною і конвективною (молярною) дифузією. Дифузія компоненту речовини у напрямі зменшення його концентрації має аналогію з передачею теплоти теплопровідністю. Конвективний масообмін здійснюється переміщенням молярних частин речовини під дією зовнішніх сил (вимушена конвекція) або різниці щільності речовини (вільна конвекція). Тому існує формальна аналогія конвективного масообміну з конвективним теплообміном. Тут важливо звернути увагу на те, що спільність природи процесів тепло- і масообміну, а також єдність носіїв теплоти і маси створюють зручну для розуміння аналогію фізичної суті, законів і математичного опису обох процесів. Аналогія дозволяє, не вдаючись до виводу, записати диференціальне рівняння молекулярної дифузії (другий закон Фіка) і критерійні рівняння масовіддачі у вигляді:

$$Nu_D = C Re^n \cdot Pr_D^m.$$

Проте при цьому необхідно розібратися в межах дії цієї аналогії, оскільки вона є неповною.

**Література:** [1, гл.14, п. 14.1–14.5].

### **Питання для самоперевірки:**

1. Чи однакові одиниці вимірювання об'ємної концентрації і щільності речовини?
2. Чи однакові одиниці вимірювання коефіцієнтів молекулярної дифузії і температуропровідності?
3. Чи однакові одиниці вимірювання коефіцієнта тепловіддачі і коефіцієнта масовіддачі?
4. Чому в правій частині першого закону Фіка стоїть знак мінус?

5. Чи однакові коефіцієнти молекулярної дифузії  $D$  і  $D_p$  для компонентів бінарної суміші?
6. Чи можна використовувати критерійні рівняння тепловіддачі для визначення коефіцієнтів масовіддачі?
7. Який зв'язок між коефіцієнтами масовіддачі, віднесеними до різниці концентрацій  $\beta$  і віднесеними до різниці парціального тиску  $\beta p$ ?
8. Чи однакові розмірності  $\beta$  і  $\beta p$ ?
9. У чому полягає обмеження аналогії в математичному описі теплообміну і масообміну?
10. Який критерій подібності дозволяє оцінити подібність полів температур і концентрацій речовин?

## **1.9. Теплообмін випромінюванням**

### **1.9.1. Основні положення і закони теплового випромінювання**

#### ***Програма:***

Основні поняття і визначення. Види променевих потоків. Інтегральний потік випромінювання. Щільність потоку випромінювання. Інтенсивність випромінювання. Поглинальна, відбивна і пропускна здібності тіл. Ефективне випромінювання. Результуюче випромінювання. Закони теплового випромінювання: Планка, Віна, Стефана–Больцмана, Кірхгофа, Ламберта.

#### ***Методичні вказівки:***

Променевий теплообмін є основним процесом передачі теплоти від продуктів згорання палива до поверхонь нагріву в топках котлів (85 % і більше). Він обумовлений перетворенням внутрішньої енергії випромінюючого тіла на електромагнітні хвилі, розповсюдженням цих хвиль в просторі (у вакуумі зі швидкістю світла, рівною  $3 \cdot 10^8$  м/с) і зворотним перетворенням енергії руху хвиль в теплоту (енергію руху молекул) при їх поглинанні якими-небудь тілами. Електромагнітні хвилі: видимі (світлові), теплові (інфрачервоні), рентгенівські, ультрафіолетові, радіохвилі і інші мають одну і ту ж природу і розрізняються лише довжиною хвилі. Окрім хвильових властивостей випромінювання володіє також корпускулярними властивостями. Енергія випромінюється і поглинається не безперервно, а дискретними порціями - квантами світла (фотонами). Тобто, випромінювання має подвійний характер: володіє властивостями безперервності поля електромагнітних хвиль і дискретності.

При вивченні теми слід засвоїти основні поняття і визначення: суцільний і селективний спектри, інтегральне і монохроматичне випромінювання, види променевих потоків і т.п. Особливо ретельно необхідно розібратися у фізичній суті потоків ефективного і результуючого

випромінювань, а також у способах їх визначення і взаємозв'язку. Необхідно розрізнати чорне випромінювання і випромінювання реальних тіл (сіре). Чорне випромінювання описується законами Планка, Віна, Стефана–Больцмана. Випромінювання сірих тіл слід розглядати як наближення до чорного тіла, що описується вищенаведеними законами шляхом введення поняття степеня чорноти сірого тіла на основі закону Кірхгофа. Розглядаючи закон Ламберта, необхідно враховувати, що багато реальних тіл (наприклад, поліровані метали) не підкоряються дифузному випромінюванню.

***Література:*** [1, гл.16, п. 16.1–16.3]; [2, гл. 5, п. 5.1].

***Питання для самоперевірки:***

1. Чи може відображений променистий потік бути більше падаючого?
2. Чи може тіло поглинати більше променевої енергії, ніж випромінювати?
3. Чи однакові одиниці вимірювання щільності потоку інтегрального випромінювання і щільності потоку спектрального випромінювання?
4. Чи може власне випромінювання бути більше ефективного випромінювання?
5. Що таке потік результуючого випромінювання?
6. Чи може власне випромінювання бути менше відображеного?
7. Чи може щільність потоку результуючого випромінювання мати мінусове значення?
8. Як змінюється максимальне значення щільності потоку спектрального випромінювання із збільшенням температури?
9. Чи може степінь чорноти сірого тіла бути більше одиниці?
10. У яких випадках можна застосовувати закон Стефана-Больцмана для розрахунків променевого теплообміну між сірими тілами?
11. У якому випадку степінь чорноти тіла дорівнює його поглинальній здатності?
12. Чи однакові значення щільності потоку випромінювання у напрямі нормалі до поверхні і щільності потоку інтегрального напівсферичного випромінювання?

**1.9.2. Теплообмін випромінюванням між твердими тілами, розділеними прозорим середовищем**

***Програма:***

Методи дослідження променевого теплообміну. Теплообмін між двома плоско-паралельними поверхнями. Теплообмін між тілом і його оболонкою. Теплообмін між двома тілами, довільно розташованими в

просторі. Кутові коефіцієнти випромінювання. Геометричні властивості променевих потоків. Методи визначення кутових коефіцієнтів випромінювання. Кутові коефіцієнти випромінювання однорядних і багаторядних трубних пучків. Кутові коефіцієнти випромінювання екранних поверхонь нагріву котлів (системи: факел–труби–обмуровка).

***Методичні вказівки:***

Слід звернути увагу на те, що в даній темі розглядаються лише прямі задачі, в яких важливе практичне значення має визначення потоків результуючого випромінювання за заданими температурами, оптичними властивостями поверхонь тіл, їх геометричною формою і розмірами. При цьому для дослідження теплообміну використовуються різні методи: багатократних поглинань і віддзеркалень, ефективних потоків, сальдо, алгебраїчний, інтегральний і диференційний. Тому необхідно мати уявлення про їх наочність, переваги і недоліки і залежно від постановки задачі використовувати найбільш простий і наочний метод рішення. Наприклад, у системі плоско-паралельних поверхонь досить простим є метод ефективних потоків.

Застосування екранів, розміщених між тілами, дає можливість істотно понизити інтенсивність променевого теплообміну. Наприклад, при установці одного екрану із ступенем чорноти  $\varepsilon_3 = 0,1$  між плоско-паралельними поверхнями з  $\varepsilon = 0,8$  результуючий променевий потік знижується приблизно в 14 разів.

При виведенні формул для розрахунку щільності потоку результуючого випромінювання між твердими сірими тілами необхідно мати чітке уявлення про роль приведенного ступеня чорноти (приведеної поглинальної здатності) системи тіл і уміти визначати її для різних випадків взаємного розташування тіл у просторі.

Необхідно розуміти фізичний сенс таких важливих для розрахунків променевого теплообміну параметрів, як кутовий коефіцієнт випромінювання (елементарний, локальний, середній) і взаємна поверхня випромінювання, а також знати методи їх визначення. Для розрахунку кутових коефіцієнтів і взаємних поверхонь випромінювання широко використовуються геометричні властивості променевих потоків.

***Література:*** [1, гл.17, п. 17.1; 17.2; 17.4–17.10; 17.14]; [2, гл. 5, п. 5.2 ].

***Питання для самоперевірки:***

1. Які переваги і недоліки методу багатократних поглинань і віддзеркалень?
2. Який фізичний сенс методів ефективних потоків і сальдо?



3. У чому складність аналітичного, інтегрального і диференційного методів дослідження променевого теплообміну?

4. Що являє собою алгебраїчний метод дослідження променевого теплообміну?

5. Які експериментальні методи дослідження променевого теплообміну застосовуються?

6. Що являє собою приведена поглинальна здатність системи взаємодіючих тіл?

7. Чому при високих температурах вплив променевого теплообміну значніше в порівнянні з теплопровідністю і конвекцією?

8. Для чого потрібні екрани, якими властивостями вони повинні володіти?

9. У скільки разів знизиться результуючий потік випромінювання при установці між двома плоско-паралельними поверхнями двох екранів з однаковим з ними ступенем чорноти?

10. Чому дорівнює середній кутовий коефіцієнт випромінювання  $\bar{\Phi}_{1,2}$  між випуклим тілом і оболонкою, що його оточує, за відсутності екранів?

11. Що являє собою елементарний кутовий коефіцієнт випромінювання?

12. Чим відрізняється середній кутовий коефіцієнт випромінювання від місцевого?

13. Що являє собою середня взаємна поверхня випромінювання?

14. У якому випадку середня взаємна поверхня випромінювання дорівнює площі поверхні тіла?

15. У чому сенс властивості взаємності променивих потоків?

16. Як формулюється властивість замикаємості променивих потоків?

17. У яких випадках середній кутовий коефіцієнт самоопромінювання не дорівнює нулю?

18. У яких випадках середній кутовий коефіцієнт випромінювання  $\bar{\Phi}_{1,2}$  не залежить від конфігурації тіла ?

19. Які властивості променивих потоків використовуються при визначенні середніх кутових коефіцієнтів випромінювання системи, що складається з трьох випуклих (або плоских) тіл, методом поточної алгебри?

### **1.9.3. Теплообмін в поглинальних і випромінювальних середовищах**

#### ***Програма:***

Особливості випромінювання газів і пари. Напівпрозорі і каламутні середовища. Рівняння переносу енергії в поглинаючому і випромінюючому

середовищах. Спектральний коефіцієнт поглинання. Закон Бугера. Оптична товщина середовища. Степінь чорноти газового об'єму. Променевий теплообмін між газовим середовищем і оболонкою. Теплообмін випромінюванням в топках і газоходах котлів.

**Методичні вказівки:**

Перш, ніж почати вивчати цю тему, необхідно з'ясувати, що в топкових камерах котельних агрегатів променевий теплообмін є визначальним, оскільки основна кількість теплоти від газів з високою температурою до екранних поверхонь передається шляхом випромінювання. У зв'язку з цим надійність теплових розрахунків топок і оптимальність їх конструкцій значною мірою залежать від обґрунтованості розроблених методик розрахунку променевого теплообміну.

Процеси випромінювання і поглинання газів в порівнянні з випромінюванням твердих тіл мають свої особливості: селективний і об'ємний характер випромінювання і поглинання. Вони визначаються спектральною інтенсивністю випромінювання  $I_\lambda$  і спектральним коефіцієнтом поглинання  $a_\lambda$ . Зв'язок між ними, тобто залежність, що виражає ослаблення інтенсивності випромінювання в поглинаючому середовищі, носить назву закону Бугера. Одним з найважливіших безрозмірних параметрів випромінювання є спектральна оптична товщина газового шару  $a_\lambda \cdot l$ , яка є відношенням товщини газового шару  $l$  до середньої довжини вільного пробігу фотонів  $1/a_\lambda$ .

Для характеристики власного випромінювання газового шару вводиться поняття спектрального степеня чорноти  $\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{o\lambda} = f(a_\lambda \cdot l)$ , який залежить лише від оптичної товщини шару. Оскільки газ випромінюють і поглинають тільки окремими смугами спектру, середня величина степеня чорноти газового шару помітно менше одиниці.

При вивченні процесу променевого теплообміну між газом і оболонкою слід звернути увагу на той факт, що випромінювання газового середовища є селективним (у вигляді окремих смуг), а випромінювання оболонки (стінки) характеризується суцільним спектром. Відповідно до цього газове середовище обмінюється променевими потоками із стінкою тільки в межах спектральних смуг, а поза цими смугами елементи стінки обмінюються променевими потоками між собою. У топках і газоходах котлів газове середовище містить в своєму складі зважені тверді частинки різних розмірів з різними оптичними характеристиками, що істотно ускладнює розрахунок променевого теплообміну.

**Література:** [1, гл.18, п. 18.1–18.6]; [2, гл. 5, п. 5.3 ].

### ***Питання для самоперевірки:***

1. Чи вірно, що випромінювальна здатність одно- і двоатомних газів вища, ніж багатоатомних?
2. Які граничні межі смуг випромінювання і поглинання вуглекислого газу і водяної пари?
3. Які особливості випромінювання і поглинання газів?
4. Що являє собою спектральна інтенсивність випромінювання?
5. Від яких основних оптичних і термодинамічних параметрів залежить спектральний коефіцієнт поглинання?
6. Чи вірно, що відповідно до закону Бугера інтенсивність випромінювання в поглинаючому середовищі обернено пропорційна її оптичній товщині?
7. Як змінюється інтенсивність зовнішнього випромінювання при поглинанні променевої енергії в плоскому шарі газу?
8. Як змінюється інтенсивність власного випромінювання плоского шару газу із збільшенням його товщини?
9. Який зв'язок оптичної товщини газового середовища з режимами випромінювання?
10. Що являє собою спектральний степінь чорноти газового шару? Від якого параметра він залежить?
11. Який зв'язок між інтегральним ступенем чорноти газового шару і його спектральним ступенем чорноти?
12. Як визначається товщина газового об'єму складної геометричної форми?
13. У яких випадках поглинальна здатність газу не рівна його ступеню чорноти?
14. При якій температурі слід вибирати степінь чорноти газу, якщо теплота передається від нагрітого газу до холодної стінки ?
15. При якій температурі слід вибирати ступінь чорноти газу, якщо теплота передається від нагрітої стінки до холодного газу ?
16. Що являють собою каламутні середовища?
17. У чому полягає особливість методики розрахунку променевого теплообміну в топках і газоходах котлів?

## **1.10. Теплообмінні апарати**

### ***Програма:***

Призначення, класифікація. Рекуперативні апарати. Основні положення теплового розрахунку. Конструкторський і повірковий розрахунки. Рівняння теплового балансу і теплопередачі. Схеми взаємного руху теплоносіїв. Середній температурний напір і методи його визначення для прямиотечії, протитечії і перехресної течії теплоносіїв. Розрахунок

кінцевих температур теплоносіїв. Зіставлення прямої і протитої. Регенеративні апарати, основи їх теплового розрахунку. Гідромеханічний розрахунок теплообмінних апаратів.

### ***Методичні вказівки:***

В процесі вивчення цієї теми необхідно звернути увагу на класифікацію теплообмінних апаратів за принципом дії, а також на те, що найбільш розповсюдженими в теплоенергетиці є рекуперативні теплообмінники. Слід мати чітке уявлення про те, що основу теплового розрахунку таких апаратів складають два рівняння: рівняння теплового балансу і рівняння теплопередачі. При цьому введення поняття «водяний еквівалент» в рівняння теплового балансу дозволило значно спростити його вираз і зв'язати з цим операції. В новій системі одиниць СІ це поняття не має сенсу, тому що питома теплоємність води не дорівнює одиниці. Тому більш доцільним є використання терміну «витратна теплоємність»  $C = C \cdot c_p$ . В залежності від співвідношення витратних теплоємностей гарячого  $C_1$  і холодного  $C_2$  теплоносіїв існують різні схеми їх взаємного руху уздовж поверхні теплообміну.

Необхідно розділяти задачі, які вирішуються при конструкторському і повірковому теплових розрахунках теплообмінних апаратів. Слід розібратись в методах визначення середнього температурного напору і кінцевих температур теплоносіїв.

Слід також пам'ятати, що тепловий розрахунок теплообмінного апарату не обмежується тільки визначенням величини його поверхні, або кінцевих температур теплоносіїв. Важливим є розрахунок його аеродинамічного і гідравлічного опорів, які визначають енергетичні витрати на рух теплоносіїв.

### ***Питання для самоперевірки:***

1. Яка відмінність в роботі рекуперативних, регенеративних і змішувальних теплообмінних апаратів?
2. Які задачі ставляться при конструктивному і повірковому теплових розрахунках теплообмінних апаратів?
3. Чи можливо, щоб кінцева температура холодного теплоносія була вища за кінцеву температуру гарячого теплоносія при прямої і протитої?
4. Чи можливо, щоб середньологарифмічний температурний напір при прямої був більшим за будь-який з кінцевих температурних напорів?
5. В яких випадках можлива заміна середньологарифмічного температурного напору на середньоарифметичний?
6. Чи вірно, що середньоарифметичне значення температурного напору завжди більше середньологарифмічного?

7. В яких випадках середній температурний напір не залежить від схеми руху теплоносіїв?

8. Чи вірно, що значення середнього температурного напору при прямотечії більше ніж при протитечії?

9. Як враховується при визначенні середнього температурного напору перехресна схема руху теплоносіїв?

10. Як здійснюється визначення кінцевих температур теплоносіїв при прямотечії?

11. Як здійснюється визначення кінцевих температур теплоносіїв при протитечії?

12. В яких випадках різниця між прямотечією і протитечією незначна?

13. Чому при конструюванні теплообмінних апаратів слід віддавати перевагу схемі протитечії руху теплоносіїв?

14. Як здійснюється тепловий розрахунок регенеративних теплообмінних апаратів?

15. Яка залежність між опором тертя і швидкістю руху теплоносія?

## **2. Контрольні роботи**

Згідно з навчальним планом студенти виконують дві контрольні роботи. Перша з них охоплює розділи курсу: теплопровідність при стаціонарному тепловому режимі; основи конвективного теплообміну; основи теорії подібності; тепловіддача при обтіканні пластини, одиночних труб і пучків труб; тепловіддача при вільній конвекції, при кипінні і конденсації. Друга робота присвячена вивченню процесів променевого теплообміну.

Контрольні роботи студенти надсилають в університет не пізніше, ніж за 10 днів до початку екзаменаційної сесії. Якщо в роботі виявлені істотні помилки, то вона повертається для доопрацювання. Виправлена робота проходить повторне рецензування.

Контрольна робота №1 складається з 4-х задач і 5-ти питань. Контрольна робота № 2 складається з 3-х задач і 5-ти питань. Номери варіантів задач і питань визначаються за таблицями 2.1–2.9 залежно від двох останніх цифр номеру залікової книжки студентів (або за вказівкою викладача).

### **2.1. Контрольна робота 1**

## Задача 1

На зовнішній поверхні корпусу бака, що є плоскою металевою стінкою, підтримується постійна температура. Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище корпус бака зовні покривається шаром діатомітової цегли завтовшки  $\delta_d$ , а потім шаром ізоляції товщиною  $\delta_{iz}$ .

Визначити мінімальну товщину шару ізоляції  $\delta_{iz}$ , при якій температура на зовнішній її поверхні не перевищувала б  $t_{C_3}$ . Температуру навколишнього повітря прийняти рівною  $t_{ж}$ , а коефіцієнт тепловіддачі від ізоляції до повітря  $\alpha$ . Визначити також температуру в зоні контакту цегляної кладки і ізоляції  $t_{C_2}$  і щільність теплового потоку, що проходить через ізольовану стінку бака. Вихідні дані до задачі 1 приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до задачі 1

Варіант	Матеріал ізоляції	$\lambda_{iz}$ , Вт/м <sup>2</sup> °C	$t_{C_1}$ , °C	$\delta_d$ , м	Підваріант	$t_{C_3}$ , °C	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> °C	$t_{ж}$ , °C
01	Скловата	0,050	320	0,12	а	40	6	21
02	Шлако-вата	0,109	340	0,14	б	42	8	22
03	Асбест	0,210	360	0,16	в	44	12	23
04	Асбозурит	0,226	380	0,18	г	46	15	24
05	Скловата	0,059	400	0,20	д	48	14	25
06	Шлако-вата	0,121	420	0,22	е	50	13	24
07	Асбест	0,214	440	0,24	ж	52	12	23
08	Асбозурит	0,240	460	0,24	з	54	11	22
09	Зоноліт	0,153	480	0,28	и	56	10	21
10	Совеліт	0,174	500	0,30	к	58	9	20

### **Методичні вказівки:**

При рішенні задачі контакт між шарами кладки і ізоляції вважати ідеальним. Для визначення коефіцієнта теплопровідності діатомітової цегли необхідно скористатися формулою:

$$\lambda_o = 0,113 + 0,0023 \cdot t$$

де  $t$  - середня температура шару цегляної кладки.

При цьому  $\lambda_d$  необхідно знаходити методом послідовних наближень. Оскільки температура на межі шарів кладки і ізоляції  $t_{C_2}$  невідома, то нею необхідно задатися, наприклад, в першому наближенні  $t = (t_{C_1} + t_{C_3})/2$ , визначивши  $\lambda_d$ , здійснити перевірку правильності ухвалення значення температури  $t_{C_2}$  за формулою:

$$t_{C_2} = t_{C_1} - q \cdot \frac{\delta_o}{\lambda_o}$$

Якщо знайдене значення  $t_{C_2}$  відрізняється більш ніж на 5 % від прийнятого, то здійснюється наступне наближення і т.д.

## Задача 2

По сталевому паропроводу зовнішнім діаметром  $d_2$  і товщиною  $\delta$  рухається насичена пара під тиском  $P$ . Коефіцієнт тепловіддачі від пари до внутрішньої поверхні труби  $\alpha_1$ . Паропровід покритий шаром ізоляції завтовшки  $\delta_{із}$ , температура навколишнього зовнішнього повітря  $t_{ж}$ , коефіцієнт тепловіддачі від ізоляції до повітря  $\alpha_2$ . Визначити теплові втрати і температуру на зовнішній і внутрішній поверхнях ізоляції. Перевірити раціональність вибору матеріалу ізоляції. Зобразити графічно в масштабі розподіл температур в циліндричній двошаровій стінці за граничних умов Ш роду. Вихідні дані до задачі 2 приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до задачі 2

Варіант	Матеріал ізоляції	$d_2$ , м	$\delta$ , м	$P \cdot 10^{-5}$ Па	$\delta_{із}$ , м	Підваріант	$t_{ж}$ , °C	$\alpha_1$ , Вт/м <sup>2</sup> °C	$\alpha_2$ , Вт/м <sup>2</sup> °C
01	Совеліт	0,060	0,003	6,18	0,008	а	16	160	6
02	Асбозурит	0,076	0,003	7,92	0,010	б	18	170	8
03	Шлако-вата	0,089	0,004	10,03	0,012	в	20	180	10
04	Асбест	0,108	0,004	12,55	0,014	г	22	190	11
05	Діатоміт молотий	0,133	0,005	15,55	0,016	д	24	200	12

Продовження таблиці 2.2

06	Совеліт	0,140	0,005	19,08	0,018	е	22	190	11
07	Асбозурит	0,159	0,006	23,20	0,020	ж	20	180	10
08	Шлако- вата	0,168	0,006	27,98	0,022	з	18	170	9
09	Асбест	0,194	0,007	33,48	0,024	и	16	160	8
10	Діатоміт молотий	0,219	0,007	39,78	0,026	к	14	150	7

**Методичні вказівки:**

Контакт між поверхнями паропроводу і ізоляції вважати ідеальним.

Значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу паропроводу вибрати залежно від температури насичення [3]. Значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу ізоляції вибрати залежно від середньої температури  $t = (t_s + t_{ж_2}) / 2$  за таблицями теплофізичних властивостей, приведених, наприклад, в таблиці 2 [3].

Раціональність вибору матеріалу ізоляції визначити на підставі умови:

$$\lambda_{из} < \alpha_2 \cdot d_2 / 2.$$

**Задача 3**

Через горизонтально розташовану трубу діаметром  $d$  і довжиною  $l$  зі швидкістю  $w$  протікає вода. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі  $\bar{\alpha}$  і тепловий потік  $Q$ , якщо середня температура води  $\bar{t}_{ж_1}$ , а температура стінки труби  $\bar{t}_c$ . Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо швидкість води збільшиться в 2 і 3 рази? Побудувати залежність  $\bar{\alpha} = f(W)$ . Вихідні дані до задачі 3 приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до задачі 3

Варіант	$d$ , м	$l$ , м	$w$ м/с	Підва- ріант	$\bar{t}_{ж_1}$ , °C	$\bar{t}_c$ , °C
01	0,035	3,0	0,75	а	50	100
02	0,040	3,5	0,85	б	60	105
03	0,045	4,0	0,95	в	70	110
04	0,050	4,5	1,05	г	80	115
05	0,055	5,0	1,15	д	90	120
06	0,060	5,5	1,25	е	80	115



Продовження таблиці 2.3

07	0,065	6,0	1,35	ж	70	110
08	0,070	6,5	1,45	з	60	105
09	0,075	7,0	1,55	и	50	100
10	0,080	7,5	1,65	к	40	95

**Методичні вказівки:**

Тепловий потік визначається за формулою Ньютона-Ріхмана:  $Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t$ , температурний напір  $\Delta t = \bar{t}_c - \bar{t}_ж$ . Величину  $\bar{\alpha}$  необхідно визначити з критерійного рівняння  $N_u = f(Re, Pr, \epsilon_c)$ , яке необхідно вибрати з [1,2] в залежності від режиму руху води в трубі.

**Задача 4**

У трубі випарної поверхні котла внутрішнім діаметром  $d$  і довжиною  $l$  рухається кипляча вода зі швидкістю  $W$ . Вода знаходиться під тиском  $P$ . Теплове навантаження поверхні нагріву  $q$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до киплячої води  $\bar{\alpha}$ , температурний напір  $\Delta t$  і температуру внутрішньої поверхні стінки труби  $t_c$ . Як зміниться значення коефіцієнта тепловіддачі, якщо температуру стінки збільшити на  $5^\circ\text{C}$  і  $10^\circ\text{C}$ ?

Побудувати графік залежності  $\alpha = f(t_c)$ . Вихідні дані до задачі 4 приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані до задачі 4

Варіант	$P \cdot 10^{-5}$ Па	$q \cdot 10^{-5}$ Вт/м <sup>2</sup>	$l$ , м	Підва- ріант	$d$ , м	$w$ , м/с
01	25	2,5	2	а	0,036	1,55
02	30	2,7	3	б	0,038	1,60
03	35	2,9	4	в	0,040	1,65
04	40	3,1	5	г	0,042	1,70
05	45	3,3	6	д	0,044	1,75
06	50	3,5	5,5	е	0,046	1,80
07	55	3,7	4,5	ж	0,048	1,85
08	60	3,9	3,5	з	0,050	1,90
09	65	4,1	2,5	и	0,052	1,95
10	70	4,3	3,2	к	0,054	2,00

### **Методичні вказівки:**

Визначення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеному русі киплячої рідини в трубах слід здійснювати за формулами, які запропоновано Лабунцов Д.А. [1,2,3]. При цьому можна скористатися методиками рішень подібного типу задач і даними таблиці 9-1, приведеними в розділі 10 [3].

Температуру насичення і інші теплофізичні параметри води слід визначати шляхом інтерполяції табличних даних, приведених в [1,2,3].

## **Питання до контрольної роботи 1**

1. Охарактеризуйте основні (елементарні) способи передачі теплоти в просторі.
2. Що являє собою температурне поле при стаціонарному і нестаціонарному теплових режимах?
3. Що являє собою температурний градієнт? Чи можуть перетинатися ізотермічні поверхні?
4. Сформулюйте поняття: тепловий потік, щільність теплового потоку, ліній теплого потоку, лінійна щільність теплового потоку. Які розмірності цих величин?
5. Сформулюйте закон теплопровідності Фур'є. Поясніть фізичний сенс величин, що входять в його математичний вираз. Чому в рівнянні закону Фур'є стоїть знак «мінус»?
6. Який фізичний сенс коефіцієнта теплопровідності? Приведіть приклади матеріалів з різними значеннями коефіцієнта теплопровідності.
7. Яку роль грає коефіцієнт теплопровідності в розрахунках процесів теплопровідності твердих тіл? Приведіть значення коефіцієнта теплопровідності для металів.
8. Чому пористі матеріали мають нижчі значення коефіцієнта теплопровідності в порівнянні з щільними? Як впливає на коефіцієнт теплопровідності вологість матеріалу?
9. Як змінюється коефіцієнт теплопровідності газів зі зміною температури і тиску?
10. Як змінюється коефіцієнт теплопровідності металів і сплавів зі зміною температури?
11. Сформулюйте рівняння Ньютона-Ріхмана. Який фізичний сенс коефіцієнта тепловіддачі?
12. Які параметри істотно впливають на коефіцієнт тепловіддачі?
13. Приведіть диференціальне рівняння теплопровідності (без виводу) і поясніть фізичний сенс його складових. Чи є це рівняння однією з форм закону збереження енергії?
14. Що являють собою умови однозначності? З якою метою вони повинні бути приєднані до математичного опису процесу теплообміну?

15. Як формулюються граничні умови I і II родів? У яких випадках теплообміну вони застосовуються?

16. Що характеризують граничні умови III і IV родів? У яких випадках теплообміну вони застосовуються?

17. Приведіть вивід диференційного рівняння тепловіддачі. Чи є це рівняння окремим випадком закону збереження енергії?

18. У чому полягає фізичний сенс коефіцієнта температуропровідності? Який його зв'язок з коефіцієнтом теплопровідності? Виведіть розмірність коефіцієнта температуропровідності на основі диференційного рівняння теплопровідності.

19. Наведіть графіки розподілу температур в плоскій тришаровій стінці однакової товщини за умови, що  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ . Чому температурні поля кожного шару різні?

20. Що являє собою еквівалентний коефіцієнт теплопровідності плоскої багат шарової стінки?

21. Наведіть графік розподілу температури в плоскій однорідній стінці для випадків, якщо коефіцієнт теплопровідності із зростанням температури: збільшується, зменшується, залишається незмінним. Дайте пояснення.

22. Які матеріали застосовуються для теплової ізоляції теплообмінного устаткування?

23. Як за допомогою графічних побудов можна визначити значення температур між шарами тришарової плоскої стінки (теплопровідність за граничних умов I роду)?

24. Види і режими руху рідини. У чому схожість і відмінність чисел Рейнольдса і Грасгофа? Вкажіть області існування:

а) вільного ламінарного і турбулентного рухів рідини уздовж вертикальної стінки;

б) вимушеного ламінарного і турбулентного рухів рідини в трубах.

25. Як змінюється градієнт температури за товщиною плоскої стінки при стаціонарному тепловому режимі, якщо коефіцієнт теплопровідності залежить від температури?

26. Охарактеризуйте особливості гідродинаміки і теплообміну при обтіканні плоскої поверхні рідиною.

27. Сформулюйте умови подібності фізичних процесів і три теореми подібності.

28. Яким вимогам повинна відповідати модель, щоб процеси, що протікають в натурній установці і моделі, були подібними?

29. Поясніть принципову відмінність між визначальними і визначасними критеріями подібності конвективного теплообміну.

30. Який фізичний сенс чисел Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта, Грасгофа, Фур'є?

31. Які параметри необхідно приймати як визначальний розмір і визначальну температуру?
32. Що є початковими ділянками гідродинамічної і теплової стабілізації при подовжній течії рідини в трубі?
33. Як розраховується тепловіддача при ламінарному і турбулентних режимах течії рідини в трубі?
34. Проаналізуйте результати взаємного впливу вимушеної і вільної конвекції в трубах.
35. Який вплив на інтенсивність теплообміну роблять вигин труби, обтікання труби з кутами атаки, діаметр труби?
36. Охарактеризуйте особливості гідродинаміки і теплообміну при поперечному обтіканні одинокої труби.
37. Наведіть основні схеми компоновки трубних пучків і охарактеризуйте гідродинамічні умови їх поперечного обтікання.
38. Як розраховується тепловіддача при вимушеному поперечному омиванні коридорних і шахових пучків труб?
39. Охарактеризуйте гідродинамічні і теплові умови при вільній конвекції в необмеженому просторі.
40. Як розраховується тепловіддача при вільній конвекції в обмеженому об'ємі?
41. Опишіть механізм бульбашкового кипіння у великому об'ємі.
42. Приведіть в графічному вигляді залежність щільності теплового потоку від температурного напору при кипінні у великому об'ємі. Поясніть сенс процесів, що відбуваються.
43. Що являють собою перша і друга критичні щільності теплового потоку при кипінні у великому об'ємі? У чому небезпека для теплообмінних апаратів наявності плівкового режиму кипіння?
44. Що таке критичний радіус і відривний діаметр бульбашки пари?
45. Як здійснюється розрахунок теплообміну при бульбашковому кипінні рідини?
46. Які умови і розрахунок теплообміну при плівковому кипінні рідини?
47. Які види конденсації пари можливі і в чому їх відмінність?
48. Як здійснюється розрахунок теплообміну при плівковій конденсації пари?
49. Який вплив на процес конденсації чинять швидкість і напрям руху пари, перегрів пари, стан поверхні, вміст газів, що не конденсуються?
50. Як визначаються середньологарифмічний і середньоарифметичний температурні напори між рідиною і поверхнею стінки?

Таблиця 2.5 – Номери питань до контрольної роботи № 1

Варіант	№ питання
01	1, 20, 21, 40, 41
02	2, 19, 22, 39, 42
03	3, 18, 23, 38, 43
04	4, 17, 24, 37, 44
05	5, 16, 25, 36, 45
06	6, 15, 26, 35, 46
07	7, 14, 27, 34, 47
08	8, 13, 28, 33, 48
09	9, 12, 29, 32, 49
10	10, 11, 30, 31, 50
11	1,2,3,4,5
12	6,7,8,9,10
13	11,12,13,14,15
14	16,17,18,19,20
15	21,22,23,24,25
16	26,27,28,29,30
17	31,32,33,34,35
18	36,37,38,39,40
19	41,42,43,44,45
20	46,47,48,49,50

## 2.2 Контрольна робота 2

### Задача 1

Обмурівка топки парового котла виконана з шамотної цегли, обшивка – з листової сталі. Між кладкою і обшивкою є зазор, який можна вважати малим в порівнянні з розмірами стін топки. Температура зовнішньої поверхні обмурівки  $t_1$ , температура сталеві обшивки  $t_2$ . Степінь чорноти шамоту  $\epsilon_{ш}$ , степінь чорноти обшивки  $\epsilon_c$ .

Визначити втрати теплоти в навколишнє середовище з одиниці поверхні в одиницю часу при стаціонарному режимі променевого теплообміну  $q_{1,2}$  значення власного  $E_{вл\ 1}$  і  $E_{вл\ 2}$  і ефективного  $E_{еф\ 1}$  і  $E_{еф\ 2}$ , відображеного  $E_{від\ 1}$  і  $E_{від\ 2}$  і падаючого  $E_{пад\ 1}$  і  $E_{пад\ 2}$  променивих потоків для шамотної кладки і сталеві обшивки.

Як зміняться втрати теплоти в навколишнє середовище  $q_{1,2}$ , якщо між обмурівкою і обшивкою встановити  $n$  екранів із ступенем чорноти  $\epsilon_{ек}$ ? Вихідні дані до задачі 1 приведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Вихідні дані до задачі 1

Ва-ріант	$\delta$ , мм	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	Підва ріант	$\epsilon_{ш}$	$\epsilon_c$	$\epsilon_{ек}$	$n$
01	20	115	40	а	0,72	0,60	0,55	1
02	22	120	45	б	0,74	0,58	0,60	2
03	24	125	50	в	0,76	0,56	0,65	3
04	26	130	55	г	0,78	0,58	0,70	2
05	28	135	60	д	0,80	0,60	0,75	1
06	30	140	55	е	0,78	0,58	0,80	2
07	32	145	50	ж	0,76	0,60	0,75	3
08	34	150	45	з	0,74	0,58	0,70	2
09	36	155	40	и	0,72	0,60	0,65	1
10	38	160	45	к	0,70	0,58	0,60	2

**Методичні вказівки:**

Обмурівку і обшивку слід розглядати як дві безмежні плоско-паралельні сірі поверхні, розділені прозорим середовищем. Втрати теплоти в навколишнє середовище являють собою результуючий тепловий потік  $q_{1,2}$ . У зв'язку з тим, що процес теплообміну є стаціонарним, щільність потоків випромінювання взаємодіючих тіл рівна, тобто  $E_1 = E_2$ . Слід також урахувати, що ступінь чорноти тіла дорівнює його поглинальній здатності, тобто  $E=A$ . При наявності екранів між поверхнями тепловий потік  $q_{1,2}$  можна визначити за формулою:

$$q_{1,2} = \frac{C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{A_1} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_{ЕКi}} + \frac{1}{A_2} - (n+1)}$$

де  $A_{EK1} = A_{1,EK1} = A_{EK1,EK2} = \dots = A_{EKn,2}$

**Література:** [1], [2].

### Задача 2

Між двома плоско-паралельними пластинами однакої довжини  $l$  і шириною  $a_1$  і  $a_2$  відбувається процес передачі теплоти випромінюванням. Відстань між пластинами  $h$ , степінь чорноти пластин  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ , температури їх поверхонь  $t_1$  і  $t_2$  (рис.1).

Визначити середні кутові коефіцієнти випромінювання  $\bar{\varphi}_{1,2}$ ,  $\bar{\varphi}_{2,1}$  і тепловий потік  $Q_{1,2}$ . Вихідні дані до задачі 2 приведені в табл.2.7.

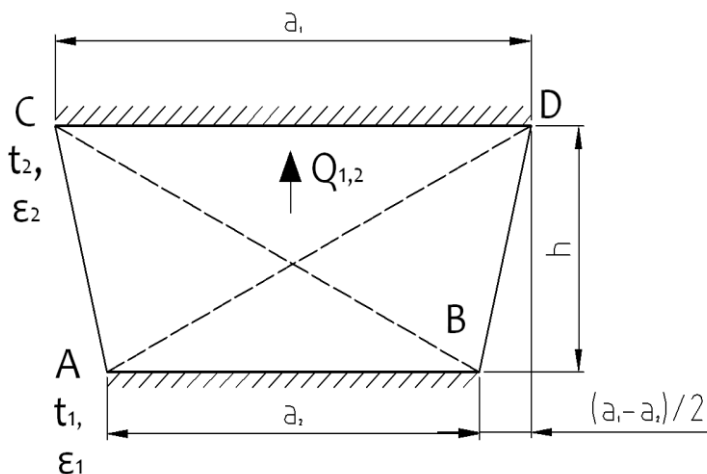


Рисунок 1 – Плоско-паралельні пластини

Таблиця 2.7 – Вихідні дані до задачі 2

Ва-ріант	$a_1$ , м	$a_2$ , м	$h$ , м	$l$ , м	Під-ва-ріант	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C
01	2,0	3,8	3,5	18	а	0,72	0,68	500	150
02	2,2	3,6	4,0	17	б	0,74	0,66	550	200
03	2,4	3,4	4,5	16	в	0,76	0,64	600	250

Продовження таблиці 2.7

04	2,6	3,2	5,0	15	г	0,78	0,62	650	300
05	2,8	3,0	5,5	14	д	0,80	0,60	700	350
06	3,0	2,8	5,0	15	е	0,78	0,62	750	400
07	3,2	2,6	4,5	16	ж	0,76	0,64	800	450
08	3,4	2,4	4,0	17	з	0,74	0,66	850	500
09	3,6	2,2	3,5	18	и	0,72	0,68	900	550
10	3,8	2,0	3,0	19	к	0,70	0,70	950	600

**Методичні вказівки:**

При визначенні кутових коефіцієнтів між двома паралельними пластинами зручно скористатися методом поточної алгебри, приведеним в [1,с.416-418]. Введемо позначення:  $F_1 = a_1 \cdot l$ ;  $F_2 = a_2 \cdot l$ ;  $F_3 = AC \cdot l$ ;  $F_4 = BD \cdot l$ ;  $F_5 = CB \cdot l$ ;  $F_6 = AD \cdot l$ .

Відповідно до властивостей замикаємості променевих потоків і невогнутості тіла:  $\bar{\varphi}_{1,2} + \bar{\varphi}_{1,3} + \bar{\varphi}_{1,4} = 1,0$ ;  $\bar{\varphi}_{1,1} = 0$ . В зв'язку з цим кутовий коефіцієнт випромінювання  $\bar{\varphi}_{1,2}$  визначається за формулою:

$$\bar{\varphi}_{1,2} = 1 - \bar{\varphi}_{1,3} - \bar{\varphi}_{1,4},$$

$$\text{де } \bar{\varphi}_{1,3} = \frac{F_1 + F_3 - F_5}{2F_1}; \quad \bar{\varphi}_{1,4} = \frac{F_1 + F_4 - F_6}{2F_1}.$$

Аналогічним чином при  $\bar{\varphi}_{2,1} + \bar{\varphi}_{2,3} + \bar{\varphi}_{2,4} = 1,0$ ;  $\bar{\varphi}_{2,2} = 0$  знаходиться  $\bar{\varphi}_{2,1}$ :

$$\bar{\varphi}_{2,1} = 1 - \bar{\varphi}_{2,3} - \bar{\varphi}_{2,4};$$

$$\text{де } \bar{\varphi}_{2,3} = \frac{F_2 + F_3 - F_6}{2F_2}; \quad \bar{\varphi}_{2,4} = \frac{F_2 + F_4 - F_5}{2F_2}.$$

Тепловий потік  $Q_{1,2}$  визначається на підставі рівняння:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \bar{H},$$



$$\text{де } \varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \bar{\varphi}_{1,2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \bar{\varphi}_{2,1} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)};$$

$\bar{H}$  – взаємна поверхня теплообміну, яка знаходиться за формулою:

$$\bar{H} = \bar{H}_1 = \bar{H}_2 = \bar{\varphi}_{1,2} \cdot F_1 = \bar{\varphi}_{2,1} \cdot F_2$$

### Задача 3

Визначити коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від газів до поверхні пароперегрівача парового котла, якщо їх температура на вході  $t_{\Gamma_1}$  і на виході  $t_{\Gamma_2}$

Прийняти температуру поверхні теплообміну (температуру стінки труб) постійною і рівною  $t_c$ , а степінь її чорноти  $\varepsilon_c$ . Розташування труб - шахове, кроки по фронту пучка труб  $S_1$  і глибини  $S_2$ , зовнішній діаметр труб  $d$ . Склад газів:  $n$  %  $\text{CO}_2$  і  $m$  %  $\text{H}_2\text{O}$ . Загальний тиск газів  $P = 98,1$  кПа. Вихідні дані до задачі 3 приведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Вихідні дані до задачі 3

Варіант	$t_{\Gamma_1}$ , °C	$t_{\Gamma_2}$ , °C	$t_c$ , °C	$\varepsilon_c$
01	1100	800	470	0,82
02	1120	820	480	0,80
03	1140	840	490	0,78
04	1160	860	500	0,76
05	1180	870	510	0,82
06	1160	850	490	0,80
07	1140	830	480	0,76
08	1120	810	470	0,78
09	1100	790	460	0,80
10	1080	770	450	0,78

Продовження таблиці 2.8

Підва-ріант	d, м	S <sub>1</sub> , м	S <sub>2</sub> , м	n %	m %
а	0,032	0,064	0,064	10	4
б	0,032	0,068	0,068	11	4
в	0,032	0,0672	0,072	12	6
г	0,038	0,076	0,076	13	6
д	0,038	0,078	0,078	14	7
е	0,038	0,08	0,08	15	7
ж	0,028	0,056	0,056	16	8
з	0,028	0,058	0,058	17	8
и	0,028	0,06	0,06	18	9
к	0,028	0,062	0,062	19	9

**Методичні вказівки:**

Для визначення середньої довжини шляху променя в міжтрубному просторі необхідно використовувати наступну залежність:

$$l = 1,08 \cdot d \cdot \left( \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 0,785 \right).$$

Степінь чорноти  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  і  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  необхідно визначати за графіками, які приведені в [1,2,3], при середній температурі газів:

$$t_{\Gamma} = \frac{t_{\Gamma_1} + t_{\Gamma_2}}{2}.$$

Поглинальна здатність газів визначається за формулою

$$A_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \left( \frac{T_{\Gamma}}{T_C} \right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

де  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  і  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  визначаються за вищезгаданими графіками при температурі стінки труб  $t_C$ .

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\alpha_n = \frac{q_n}{t_r - t_c},$$

де -  $q_n$  щільність теплового потоку випромінюванням (від газів до поверхні труби), визначається за відомими з [1,2,3] залежностями.

### Питання до контрольної роботи 2

1. Променевий теплообмін між тілом і оболонкою, розділеними прозорим середовищем, за наявності одного екрану.
2. Поняття кутового коефіцієнта випромінювання при променевому теплообміні між тілом і оболонкою, розділеними прозорим середовищем.
3. Виведення залежності між щільністю потоків результуючого і ефективного випромінювань.
4. Застосування екранів для зниження інтенсивності променевому теплообміну. Щільність потоку результуючого випромінювання.
5. Як впливає кількість екранів і їх степінь чорноти на інтенсивність теплообміну?
6. Поняття результуючого, власного і ефективного променевих потоків.
7. Закон Кірхгофа і його наслідки.
8. Результуючий променевий потік для системи з двох твердих сірих тіл.
9. Що являє собою потік результуючого випромінювання і як він може бути визначений?
10. Теплове випромінювання газів, основні поняття.
11. Коефіцієнт поглинання при променевому теплообміні в газах.
12. Зв'язок між спектральною і інтегральною інтенсивностями випромінювання в газах.
13. Закон Стефана-Больцмана. Зв'язок його з законом Планка.
14. Визначення кутових коефіцієнтів випромінювання для системи з трьох плоских або випуклих тіл. Метод потокової алгебри.
15. Щільність потоку результуючого випромінювання при теплообміні між двома плоскими паралельними пластинами. Метод багатократних віддзеркалень.
16. Променевий теплообмін між двома плоско-паралельними тілами. Метод ефективних потоків випромінювання.
17. Променевий теплообмін, основні поняття і визначення.

18. Співвідношення між поглинальною, відбивною і пропускнуою спроможностями твердого тіла. Поняття абсолютно- чорного, білого, діатермічного тіл.

19. Закон Планка і його наслідки. Приведіть його графічну інтерпретацію.

20. Закон Віна. Приклади його практичного застосування.

21. Поглинання променевої енергії в плоскому шарі газу, закон Бугера.

22. Що являє собою середня взаємна поверхня випромінювання?

23. Власне випромінювання плоского шару газу. Інтенсивність випромінювання в залежності від його товщини.

24. Закон Ламберта. Умови його справедливості.

25. Особливості випромінювання газів і пари, в порівнянні з випромінюванням твердих тіл.

26. Променевий теплообмін між газовим середовищем і оболонкою.

27. Потік результуючого випромінювання при теплообміні між тілом і оболонкою. Поняття кутового коефіцієнта випромінювання.

28. Властивості взаємності і замикаємості променевих потоків.

29. Спектральний і інтегральний степінь чорноти газового об'єму.

30. Визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання методом потокової алгебри для системи з двох плоско-паралельних тіл.

31. Оптична товщина випромінюючого шару, її фізичний сенс і зв'язок з режимами випромінювання.

32. Променевий теплообмін в поглинаючих і випромінюючих середовищах, основні поняття.

33. Поняття про складний теплообмін. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

34. Види променевих потоків, інтегральна і спектральна щільність потоку випромінювання.

35. Інтенсивність (яскравість) спектрального і інтегрального випромінювань.

36. Поняття степеня чорноти тіла, закон Стефана-Больцмана для сірого тіла.

37. Рівняння перенесення енергії в поглинаючому середовищі. Закон Бугера.

38. Геометричні властивості променевих потоків.

39. Променевий теплообмін між твердими тілами, довільно розташованими в просторі.

40. Що таке елементарний, місцевий і середній кутові коефіцієнти випромінювання? Як вони визначаються?

41. Приведіть класифікацію теплообмінних апаратів за принципом дії і дайте їх коротку характеристику. Приклади.

42. У чому відмінність проектних і перевірочних теплових розрахунків теплообмінних апаратів?

43. Наведіть і охарактеризуйте основні рівняння, які використовуються при тепловому розрахунку рекуперативного теплообмінного апарату.

44. Наведіть і охарактеризуйте основні схеми руху теплоносіїв в рекуперативних теплообмінних апаратах.

45. Наведіть вивід середнього температурного напору для прямотечії.

46. Як визначається середній температурний напір при протитечії і перехресній течії?

47. Як здійснюється розрахунок кінцевих температур теплоносіїв при прямотечії і лінійному законі зміни температур уздовж поверхні теплообмінного апарату?

48. Як здійснюється розрахунок кінцевих температур (без виводу) при прямотечії і протитечії при довільному законі зміни температур уздовж поверхні теплообмінного апарату?

49. Проведіть порівняння прямотечії з протитечією і зробіть висновки.

50. Як здійснюється спрощений тепловий розрахунок регенеративного теплообмінного апарату?

Таблиця 2.9 – Номери питань до контрольної роботи 2

<b>Варіант</b>	<b>№ питання</b>
01	1, 20, 21, 40
02	2, 19, 22, 39
03	3, 18, 23, 38
04	4, 17, 24, 37
05	5, 16, 25, 36
06	6, 15, 26, 35
07	7, 14, 27, 34
08	8, 13, 28, 33
09	9, 12, 29, 32
10	10, 11, 30, 31
11	1,2,3,4
12	6,7,8,9
13	11,12,13,14
14	16,17,18,19
15	21,22,23,24
16	26,27,28,29

Продовження таблиці 2.9

17	31,32,33,34
18	36,37,38,39
19	40,30,20,10
20	36,37,38,39

## ЗМІСТ

Загальні методичні вказівки	3
Список літератури	4
1 Навчальна програма і методичні вказівки	
1.1 Вступ. Основні положення теорії теплопровідності	4
1.2 Теплопровідність при стаціонарному тепловому режимі	7
1.3 Основні положення теорії конвективного теплообміну	10
1.4 Конвективний теплообмін при вимушеному русі рідини	13
1.5 Конвективний теплообмін при вільному русі рідини	15
1.6 Теплообмін при кипінні рідини	16
1.7 Теплообмін при конденсації чистої пари	19
1.8 Конвективний теплообмін	20
1.9 Теплообмін випромінюванням	
1.9.1 Основні положення і закони теплового випромінювання	22
1.9.2 Теплообмін випромінюванням між твердими тілами, розділеними прозорим середовищем	23
1.9.3 Теплообмін в поглинаючих і випромінюючих середовищах	25
1.10 Теплообмінні апарати	27
2 Контрольні роботи	29

## Навчальне видання

Програма, методичні вказівки та контрольні завдання з курсу «Тепломасообмін» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли та реактори» усіх форм навчання

Укладачі: ГОНЧАРЕНКО Леонід Васильович  
ТЮТЮНИК Лариса Іванівна  
ГОНЧАРЕНКО Олександр Леонідович

Відповідальний за випуск О.В.Єфімов  
Роботу до друку рекомендував Ю.В.Шульгін

В авторській редакції

План 2009р., поз. 36/ 60-09

Підп. до друку ХХ.ХХ.09. Формат 60x84 1/16. Папір офсет. №2.  
Друк – ризографія. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,8.  
Обл. – вид. арк. 2,0. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ» 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

---

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21