

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**Робоча програма,  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової  
теплотехніки» для студентів спеціальності  
6.050401 – Металургія (бакалаврський рівень)**

**Дніпро НМетАУ 2019**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**Робоча програма,  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової  
теплотехніки» для студентів спеціальності 6.050401 –  
Металургія (бакалаврський рівень)**

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,  
затвердженим Вченою радою НМетАУ  
Протокол № 1 від 21.01.2019

**Дніпро НМетАУ 2019**

## **УДК 669.041/046**

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової теплотехніки» для студентів спеціальності 6.050401 – Металургія (бакалаврський рівень) / Укл.: О.В. Гупало, О.О. Єрьомін, Л.О. Воробйова, Ю.М. Радченко. – Дніпро : НМетАУ, 2019. – 38 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової теплотехніки», приклади розрахунків процесів теплообміну, індивідуальне завдання, контрольні питання, рекомендована література.

Призначено для студентів спеціальності 6.050401 – Металургія освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр.

Друкується за авторською редакцією.

Укладачі: О.В. Гупало, канд. техн. наук, доц.  
О.О. Єрьомін, д-р техн. наук, проф.  
Л.О. Воробйова, канд. техн. наук, доц.  
Ю.М. Радченко, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск О.О. Єрьомін, д-р техн. наук, проф.

Рецензент М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

Національна металургійна академія України  
49600, Дніпро – 5, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

## ВСТУП

Технологічні процеси підготовки металургійної сировини, виробництва чорних металів, прокатки, кування, відливки, термічної обробки виробів відбуваються, як правило, при високих температурах. При цьому основним видом устаткування є високотемпературні теплові агрегати, в робочому просторі яких відбувається генерація теплоти з того чи іншого виду енергії і передача її матеріалу, який піддається тепловій обробці.

Процеси, що протікають в металургійних печах, та конструкції найбільш поширених нагрівальних пристроїв, розглядаються при вивченні дисциплін «Теплотехніка» та «Металургійні печі» на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти спеціальності 136 – Металургія. Дисципліну «Технологія процесів промислової теплотехніки» спрямовано на розширення уявлень та поглиблення знань набутих під час вивчення вищезгаданих дисциплін. Програма навчального курсу охоплює питання генерації теплоти за рахунок спалювання палива або перетворення електричної енергії в теплову та технологічних особливостей процесів тепломасообміну, які відбуваються під час теплової обробки матеріалів.

Значну частину курсу приділено вивченню основ теорії горіння палив та технологічних особливостей їх спалювання, розглядається теплотехнічна оцінка промислових палив, аналізуються паливні баланси металургійних підприємств, приділяється увага питанням ефективного використання палива та конструюванню приладів для його спалювання. Під час вивчення тепломасообмінних процесів студенти розширюють теоретичні знання з технології плавлення, розливання, кристалізації металу, нагрівання та термічної обробки сталі, опановують методики розрахунку процесів теплообміну та навчаються розробляти режими теплової обробки матеріалів, які забезпечують високі вимоги до якості теплової обробки, враховують існуючі технологічні обмеження, забезпечують зниження енерговитрат на здійснення технологічного процесу.

Без глибокого розуміння фізичної сутності процесів, що відбуваються в теплотехнічних агрегатах металургійного виробництва, і без достатньої теоретичної підготовки неможливо вирішувати складні інженерні завдання, пов'язані з їх конструюванням і експлуатацією. У зв'язку з цим вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової теплотехніки» має першорядне освітнє значення для студента-металурга.

# **1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ»**

## **Розподіл навчальних годин**

Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	270
аудиторні заняття, з них:	36
лекції	20
лабораторні роботи	8
практичні заняття	8
семінарські заняття	—
Самостійна робота, у тому числі при:	234
вивченні розділів програми, які не викладаються на лекціях	192
виконанні курсової роботи	30
виконанні індивідуального завдання	12
Підсумковий контроль	екзамен

## **Характеристика дисципліни**

Навчальна дисципліна «Технологія процесів промислової теплотехніки» є нормативною і входить до циклу дисциплін професійної і практичної підготовки.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та набуття навичок, необхідних для визначення основних параметрів палива, виконання розрахунків та оцінювання процесів спалювання палива, обслуговування паливного господарства металургійного підприємства, а також засвоєння знань про фізичну сутність тепломасопереносу у металургійних процесах і набуття навичок з питань розрахунків процесів тепломасообміну в металургійних агрегатах.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

– елементи теорії горіння палива;

- принципи та методики розрахунків спалювання газового, рідкого і твердого палив;
- особливості опалювання теплових агрегатів різними видами палив;
- системи опалювання печей, побудову та функціонування паливного господарства підприємства;
- основні методи розрахунків теплообміну в печах;
- теплофізичні процеси, що мають місце у металургійних печах і їхню фізичну сутність;
- математичний опис процесів переносу тепла та маси у цих процесах;
- способи визначення характеристик теплофізичних процесів у металургійних печах.

вміти:

- виконати аналіз процесів горіння та властивостей високотемпературної газової фази;
- вибрати та обґрунтувати ефективні засоби підготовки сировини і матеріалів;
- контролювати стан та роботу основного та допоміжного устаткування цехів металургійного заводу;
- обрати і обґрунтувати раціональні способи та режими теплової обробки матеріалів;
- визначити доцільні параметри типового технологічного процесу;
- обрати і обґрунтувати необхідне технологічне устаткування для реалізації теплової обробки;
- контролювати ведення технологічних процесів з розливання сталі відповідно до технологічних інструкцій, оперативно виявляти й усувати причини їх порушень;
- розрахувати планові норми витрати сировини, матеріалів та енергоресурсів, виявляти резерви раціонального використання виробничих ресурсів, зниження витрат на виробництво та підвищення прибутку.

Критерії успішності – отримання позитивних оцінок під час захисту індивідуального завдання і курсової роботи та складанні екзамену у тестовій формі.

Засоби діагностики успішності навчання – комплект вихідних даних до виконання індивідуального завдання та курсової роботи, комплект тестових завдань до складання екзамену.

Зв'язок з іншими дисциплінами – вивчення дисципліни «Технологія процесів промислової теплотехніки» базується на знанні широкого кола питань, попередньо опанованих у курсах «Вища математика», «Фізика», «Теплотехніка», «Металургійні печі», «Теоретичні основи процесів промислової теплотехніки», «Конструкції технологічних агрегатів» та ін.

Набуті знання і вміння використовуються під час вивчення дисциплін «Технології нагрівання сталі» та «Теорія печей», а також під час виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра.

### **Зміст дисципліни**

**Основи теорії горіння та теплотехнічна оцінка палива.** Енергетика реакцій горіння. Швидкість реакцій горіння. Ланцюгові реакції горіння. Займання палива. Межі займання газових палив. Швидкість розповсюдження полум'я. Модель неповного горіння газового палива. Реакція водяного газу. Система рівнянь неповного горіння газового палива. Модель неповного горіння твердого палива, основні залежності. Відомості про існуючі способи теплотехнічної оцінки палив. Коефіцієнт використання палива. Аналіз факторів, що його визначають.

**Технологічні особливості спалювання газового та рідкого палива в промислових печах.** Основи теорії факела. Ламінарний і турбулентний факел, їх структура та закономірності виникнення. Параметри факела. Довжина ламінарного факела, фактори, які її визначають. Модель турбулентного факела за Й.Д. Семікіним, формула Семікіна Й.Д. для визначення довжини турбулентного факела. Аналіз факторів, що визначають довжину турбулентного факела. Класифікація пальникових пристроїв. Конструкції пальників з повним зовнішнім змішуванням, головні розрахункові співвідношення для визначення параметрів цих пальників. Схеми та конструкції пальників з частковим попереднім змішуванням, визначення їхніх параметрів. Схеми та конструкції пальників з повним попереднім змішуванням. Інжекційні пальники, рівняння інжекції. Експлуатаційні властивості рідких палив та елементи теорії їх розпилювання. Густина, умовна в'язкість та температура спалаху рідких палив; зв'язок їх з теплотехнічними властивостями факела. Класифікація форсунок. Основні

закономірності розпилювання рідин пневматичними форсунками. Конструкції та особливості роботи форсунок і газо-мазутних пальників. Схеми і конструкції механічних форсунок, їхні можливості в умовах металургійних печей. Схеми та конструкції пневматичних форсунок низького тиску, область їх застосування. Основні розрахункові співвідношення. Схеми і конструкції форсунок високого тиску. Форсунки ДМетІ та УПІ, особливості їхньої роботи та розрахунку. Схеми і конструкції газо-мазутних пальників з форсунками високого тиску.

**Технологічні особливості спалювання та газифікації твердого палива у промисловості.** Вимоги до гранулометричного складу твердого палива у залежності від способу його спалювання. Технологія підготовки твердого палива для спалювання у вигляді пилу або дрібно кусковому вигляді. Головні закономірності шарового спалювання твердого палива. Сучасні фізико-хімічні уявлення про горіння куска вуглецю. Концентраційні та температурні діаграми шарового процесу горіння твердого палива. Основні розрахункові співвідношення хімічних реакцій у шарі палива. Класифікація топок твердого палива у залежності від висоти його шару. Характеристика пиловугільного факела та основні вимоги до організації руху енергоносіїв, що забезпечують ці характеристики. Конструкції та схеми найбільш розповсюджених пиловугільних пальників. Конструкції топок повного спалювання твердого палива. Конструкції газогенераторів із нерухомим шаром палива. Технологічні зони шару палива у газогенераторах. Характеристика генераторних газів.

**Паливне господарство металургійних підприємств.** Поняття про тепловий баланс підприємства з повним металургійним циклом. Аналіз складових теплового балансу підприємства. Відомості про складові паливного господарства металургійного підприємства, їхнє призначення, принцип дії та побудову. Принципи побудови паливних мереж підприємства та їх розрахунків. Призначення та принцип дії понижувачів та регуляторів тиску газу. Схеми та призначення газорегуляторних пунктів. Схеми газгольдерів. Змішувачі газів. Гідравлічні випробування газопроводів. Підготовка газопроводів до експлуатації. Схеми підготовки та використання рідкого палива для опалювання печей. Паливне складське господарство підприємства.



### **Технологічні особливості теплової обробки матеріалів в шарі.**

Теплообмін в нерухомому шарі, скрізь який проходить потік теплоносія (задача Шумана). Визначення коефіцієнта теплообміну. Облік термічної масивності частинок шару. Тепло-масообмін у шарі, що рухається в потоці теплоносія. Теплообмін у протитечії та прямотечії, фізична модель процесів, їх математичне формулювання, математичний розв'язок задач теплообміну. Теплообмін в шарі при наявності хімічних або фазових перетворень. Приклади процесів з хімічними перетворюваннями. Інженерний метод урахування тепла ендотермічних або екзотермічних реакцій. Ефективна теплоємність. Метод інтервалів. Теплофізичні процеси при випалюванні окатишів. Загальна характеристика процесу. Головні хімічні реакції, дифузійні процеси та їх зв'язок з процесами тепло-масообміну. Вплив різних факторів на процес випалювання. Основні типи печей та пристроїв для випалювання окатишів. Загальна характеристика процесу отримання вапна. Процеси дифузії і тепло-масообміну, які мають місце при випалюванні вапняку. Шахтні та обертові печі. Печі киплячого шару. Режимми випалювання. Теплофізичні процеси при агломерації залізо-рудної сировини. Загальна характеристика процесу згрудкування сировини. Теплофізичні процеси при агломерації. Зони теплообміну, їх характеристики. Основні фактори, що впливають на процес.

**Теплотехнології процесів плавлення, розливання та твердіння матеріалів.** Аморфні та кристалічні структури речовини. Властивості речовин у твердому та рідкому станах. Загальна характеристика процесів плавлення та твердіння. Діаграма фазового стану. Теплота фазового переходу. Інженерні методи розрахунків процесів плавлення. Плавлення та твердіння тіл при збереженні та миттєвому видаленні розплаву. Застосування методу теплової діаграми для розрахунків процесів плавлення. Теплофізичні процеси, що мають місце при кристалізації злитка. Методи розрахунків процесу кристалізації. Задача Стефана. Моделювання кристалізації сплавів. Особливості процесу отримання безперервного злитка. Теплофізичні процеси в кристалізаторі та зоні вторинного охолодження.

### **Технологічні особливості нагрівання матеріалів в паливних печах.**

Нагрівання і термообробка сталі у зв'язку з діаграмами залізо-цементит та ізотермічного розпаду аустеніту. Нагрівання сталі під кування, пресування, прокату; вимоги до якості нагрівання. Види відпалу та загартування сталей.

Термічні напруження, що виникають у сталі під час нагрівання, причини їх виникнення. Розрахунок напружень в ізотропних пружних матеріалах. Структурні напруження у сталях, залишкові напруження, взаємодія таких напружень з термічними напруженнями. Рекомендації по нагріванню різноманітних марок сталі з урахуванням механічних властивостей сталі та термонапруженнями. Окислення сталі під час нагрівання. Окислювачі пічної атмосфери у процесах нагрівання сталі. Реакції окислювання заліза. Механізм утворення високотемпературної окалини. Окислення сталі у ковальському процесі з проміжними нагрівками. Заходи по зменшенню окалиноутворення. Знеуглецювання сталі під час нагрівання та причини його виникнення. Шкідливі наслідки поверхневого знеуглецювання сталі для її механічних властивостей. Реакції знеуглецювання сталі, можливість їх перебігу у залежності від її складу та умов нагрівання. Склад захисних газів пічної атмосфери для запобігання знеуглецюванню. Вимоги до складу пічної атмосфери у залежності від завдань по нагріванню сталі. Зв'язок типу печі з можливостями застосування певної атмосфери. Захисні гази для пічних атмосфер.

**Технологічні особливості нагрівання матеріалів в електричних печах та пристроях.** Класифікація електричних печей. Основні параметри електричних печей. Особливості теплообміну в електричних печах. Сфера застосування електричних печей та пристроїв. Особливості теплової роботи електричних печей спротиву постійної та періодичної дії. Особливості теплообміну в електричних конвективних печах. Особливості електричних печей прямої дії. Інфрачервоне нагрівання матеріалів. Сфера застосування індукційного нагрівання. Основні фізичні процеси при індукційному нагріванні. Особливості теплового розрахунку нагрівання матеріалів в індукційній печі. Пристрої для індукційного гартування.

**Технологічні особливості охолодження елементів обладнання та виробів.** Загальна характеристика процесів охолодження в металургії. Охолодження у великому об'ємі рідини. Охолодження металу на відкритому повітрі. Струминне охолодження. Охолодження металу в машинах безперервного лиття сталі. Теплообмін в кристалізаторі. Характеристика зони вторинного охолодження. Машина безперервного лиття з опорними роликами та водяними форсунками. Охолодження контактом з роликами, конвекція та випарювання рідини, теплообмін випромінюванням.

Охолодження прокату. Температурні умови на рольгангу. Водяне та повітряне охолодження прокату. Механізми передачі теплоти. Конвекція і випромінювання. Струменеві та шарові системи охолодження. Критеріальні залежності для конвективної тепловіддачі. Теплообмін при гартуванні виробів. Гартування в об'ємі рідини. Теплофізичні процеси, що виникають у процесі гартування. Кипіння рідини на поверхні виробів. Бульбашковий та плівчастий режими. Характер зміни теплового потоку. Вплив різних факторів на процес гартування.

### **Лабораторні заняття (8 годин)**

1. Вивчення процесу випалювання.
2. Дослідження нагрівання сталевого циліндра.

### **Практичні заняття (8 годин)**

1. Розрахунок пальникового пристрою.
2. Розрахунки процесу плавлення інженерним методом.

### **Курсова робота (30 годин)**

Тепловий розрахунок нагрівальної печі

### **Рекомендована література**

1. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. - М.: Металлургия, 1965. - 392 с.
2. Абраменков Ю.Я. Топливо, огнеупоры, металлургические печи. Ч. 1. К.: УМК ВО, 1991. - 88 с.
3. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и поточные устройства. - М.: Энергия, 1976. - 488 с.

4.   Металлургические печи. Теория и расчеты: Учебник. В 2-х т. Т. 2 / В. И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. - Минск: Беларус. наука, 2007. - 832 с.
5.   Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учебное пособие для вузов. - Днепропетровск: Пороги, 2004. - 154 с.
6.   Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учебное пособие.- Днепропетровск: Пороги, 2006.- 532 с.
7.   Теплофизика металлургических процессов.- Матрюков Б.С.- М.: МИСИС, 1996.- 268 с.
8.   Теплотехнические расчеты металлургических печей. / Китаев Б.И. и др. - М.: Металлургия, 1970.- 528 с.
9.   Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена.- М.: Высшая школа, 1990.- 207 с.
10.   Электротермическое оборудование: Справочник / Под общ. ред. А.П. Альтгаузена. - М.: Энергия, 1980. - 416 с.

## 2 ТЕПЛООБМІН В НЕРУХОМОМУ ШАРІ

### 2.1 Теоретичні відомості

Теплообмін в шарі має місце в різних технологічних процесах, наприклад, при нагріванні або випалюванні сипких матеріалів, при нагріванні шихти в печах шахтного типу, в регенеративних теплообмінниках.

Шар характеризується середнім діаметром частинок (кусків)  $d$  і шпаристістю  $\epsilon$ , яка вимірюється відношенням об'єму порожнин між частинками до всього об'єму шару. Для щільного шару значення шпаристості лежать в межах від 0,35 до 0,6.

При русі газу крізь шар матеріалу здійснюється складний теплообмін, в якому основна частина теплоти передається конвекцією, а іншими видами теплообміну, з огляду на їх незначний вклад в процес теплопередачі, зазвичай нехтують. Для зручності розрахунків використовують об'ємний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_v$ , який для кускового матеріалу можна обчислити за формулою Б.І. Китаєва:

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{W_{r0}^{0,9} \cdot T^{0,3}}{d^{0,75}}, \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)}, \quad (2.1)$$

де  $W_{r0}$  – швидкість газу у вільному перерізі шару за нормальних умов, м/с;

$T$  – середня температура шару, К;

$d$  – середній діаметр кусків шару, м.

Для невеликих круглих частинок можна використовувати формули В.М. Тимофєєва:

$$Nu = \begin{cases} 0,106 \cdot Re, & \text{для } Re \leq 200, \\ 0,61 \cdot Re^{0,67}, & \text{для } Re > 200, \end{cases} \quad (2.2)$$

де  $Nu = \frac{\alpha_F \cdot d}{\lambda_\Gamma}$  – число Нуссельта;

$Re = \frac{W_{\Gamma 0} \cdot d}{\nu_\Gamma}$  – число Рейнольдса;

$\alpha_F$  – коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до одиниці площі поверхні кускового матеріалу, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_\Gamma$  – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·К);

$\nu_\Gamma$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості газу, м<sup>2</sup>/с;

Після визначення числа Нуссельта за рівнянням (2.2) розраховується коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_F = Nu \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{d}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (2.3)$$

а потім розраховується об'ємний коефіцієнт теплопередачі:

$$\alpha_v = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \alpha_F}{d}, \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)}, \quad (2.4)$$

Для урахування термічної масивності частинок можна використати наближений метод, заснований на заміні коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_v$  коефіцієнтом теплопередачі:

$$k_v = \frac{\alpha_v}{m}, \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)}, \quad (2.5)$$

де  $m \approx 1 + \frac{Bi}{k_1 + 2}$  – коефіцієнт масивності частинок шару;

$Bi = \frac{\alpha_F \cdot R}{\lambda_M}$  – число Біо;

$R$  – середній радіус частинок шару, м;

$\lambda_M$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару, Вт/(м·К);

$k_1$  – коефіцієнт форми тіла, який для кулі дорівнює 3.

Після визначення коефіцієнта теплопередачі  $k_v$  розраховуються безрозмірний час  $Z$  і безрозмірна товщина шару  $Y$ :

$$Z = \frac{k_v \cdot \tau}{C_m \cdot \rho_m \cdot (1 - \varepsilon)}; \quad (2.6)$$

$$Y = \frac{k_v \cdot y}{C_g \cdot W_{g0}}, \quad (2.7)$$

де  $\tau$  – поточний час, с;

$C_m$  – середня питома теплоємність матеріалу шару, Дж/(кг·К);

$\rho_m$  – густина матеріалу шару, кг/м<sup>3</sup>;

$y$  – поточна координата товщини шару, м;

$C_g$  – середня питома теплоємність газу, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Далі за допомогою графіків Шумана [8], наведених на рис. 2.1 и 2.2, визначаються відносні температури газу  $\theta_g = \theta_g(Y, Z)$  і матеріалу  $\theta_m = \theta_m(Y, Z)$ .

З використанням рівнянь:

$$\theta_g = \frac{t_g - t_{m0}}{t_{g0} - t_{m0}}; \quad (2.8)$$

$$\theta_m = \frac{t_m - t_{m0}}{t_{g0} - t_{m0}}, \quad (2.9)$$

розраховуються температури газу та матеріалу:

$$t_g = t_{m0} + \theta_g \cdot (t_{g0} - t_{m0}), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.10)$$

$$t_m = t_{m0} + \theta_m \cdot (t_{g0} - t_{m0}), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.11)$$

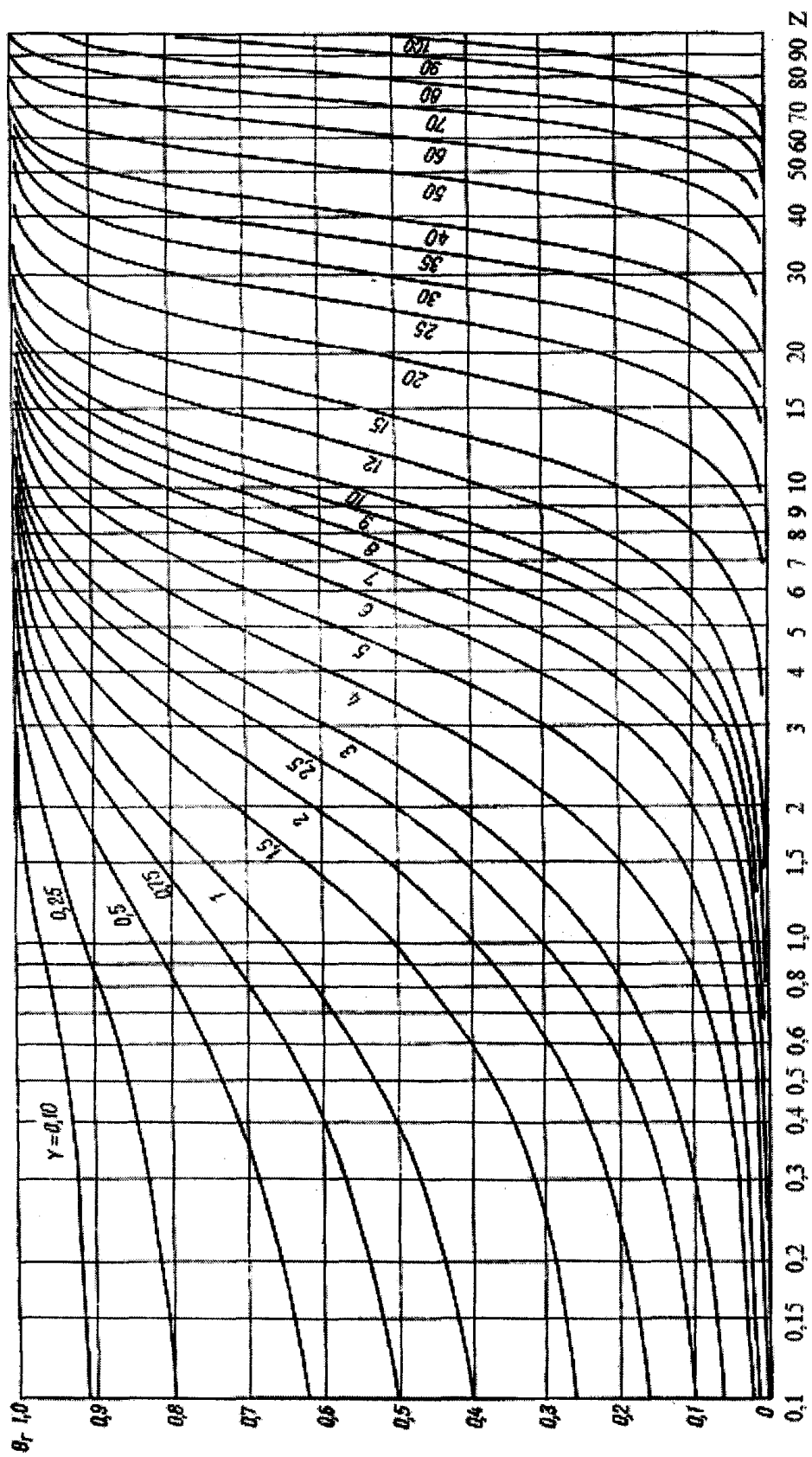


Рисунок 2.1 – Графік Шумана для визначення відносної температури газу в нерухомому шарі



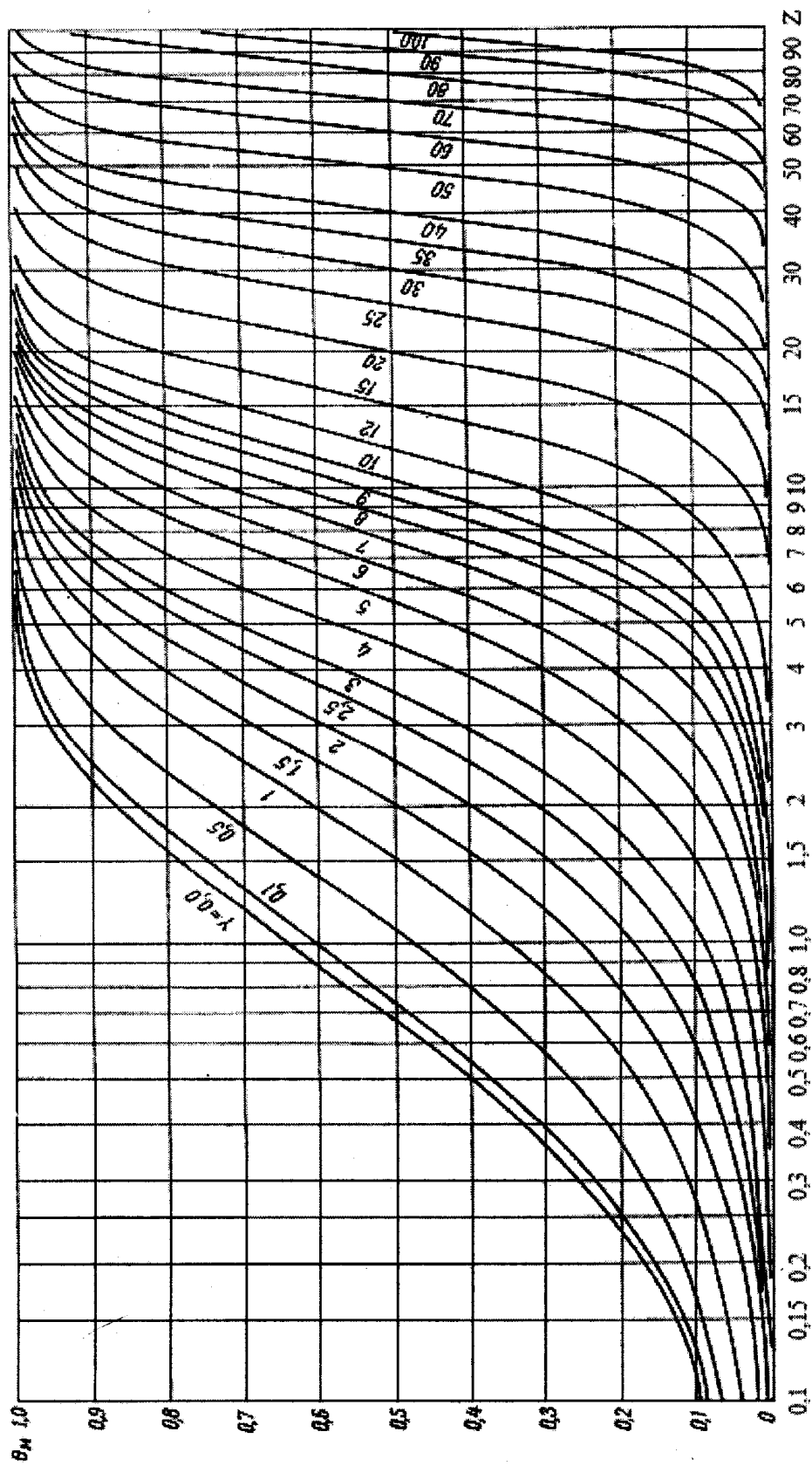


Рисунок 2.2 – Графік Шумана для визначення відносної температури матеріалу в нерухомому шарі

## 2.2 Приклади розрахунків теплообміну в нерухомому шарі

**Задача 2.1.** Нерухомий шар товщиною  $H$  та шпаристістю  $\varepsilon$  складається з кусків матеріалу середнім діаметром  $d$ . Відомі властивості матеріалу: густина  $\rho_m$ , питома теплоємність  $C_m$ , теплопровідність  $\lambda_m$ . Початкова температура шару дорівнює  $t_{m0}$ . Крізь шар проходить газ, який на вході в шар має швидкість  $W_{г0}$  і температуру  $t_{г0}$ . Також відома теплоємність газу  $C_г$ . Знайти температуру матеріалу в місці виходу газу із шару через час  $\tau$  після початку процесу нагрівання.

Вихідні дані до задачі 2.1 наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані до задачі 2.1.

Номер варіанта	$\varepsilon$	$d$ , см	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_m$ , Дж/(кг·К)	$\lambda_m$ , Вт/(м·К)	$H$ , м
1	0,6	1,6	3300	1500	2	0,1
2	0,6	1,7	3350	1600	2	0,11
3	0,6	1,8	3400	1500	2	0,12
4	0,6	1,9	3450	1600	2	0,13
5	0,6	2,0	3400	1500	2	0,14
6	0,58	1,9	3350	1600	2	0,15
7	0,58	1,8	3300	1400	2,2	0,14
8	0,58	1,7	3250	1450	2,2	0,13
9	0,58	1,6	2585	1400	2,2	0,12
10	0,58	1,5	3250	1450	2,2	0,11
11	0,63	1,6	3375	1500	2,5	0,105
12	0,63	1,7	3300	1600	2,5	0,115
13	0,63	1,8	3350	1550	2,5	0,125
14	0,63	1,9	3400	1650	2,5	0,135
15	0,56	2,0	3345	1400	2,5	0,145
16	0,56	1,9	3340	1430	2,5	0,115
17	0,62	1,8	3350	1470	2,7	0,125
18	0,62	1,7	3300	1520	2,7	0,15
19	0,61	1,6	3250	1560	2,7	0,125
20	0,6	1,5	3200	1400	2	0,1

Продовження табл. 2.1

Номер варіанта	$t_{m0}, ^\circ\text{C}$	$t_{r0}, ^\circ\text{C}$	$W_{r0}, \text{м/с}$	$C_r,$ $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$	$\tau,$ хвилин
1	0	500	0,3	1100	10
2	5	500	0,4	1200	11
3	10	500	0,3	1300	12
4	15	600	0,4	1100	13
5	20	600	0,5	1200	14
6	15	600	0,5	1300	13
7	10	600	0,4	1100	12
8	5	600	0,5	1200	11
9	0	700	0,3	1300	10
10	25	700	0,35	1150	9
11	25	700	0,35	1150	8
12	0	700	0,45	1250	9
13	5	650	0,45	1250	11
14	5	650	0,55	1350	12
15	10	650	0,55	1350	13
16	10	650	0,55	1400	12
17	15	550	0,45	1400	11
18	15	550	0,45	1375	10
19	0	550	0,4	1275	9
20	5	450	0,4	1000	8

Як приклад, розглянемо розв'язок задачі 2.1 для варіанта 20.

Розрахуємо об'ємний і поверхневий коефіцієнти тепловіддачі:

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{W_{r0}^{0,9} \cdot (t_{r0} + 273)^{0,3}}{d^{0,75}} = 186 \cdot \frac{0,4^{0,9} \cdot (450 + 273)^{0,3}}{0,015^{0,75}} = 13710 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_F = \alpha_v \cdot \frac{d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} = 13710 \cdot \frac{0,015}{6 \cdot (1 - 0,6)} = 85,69 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha_F \cdot R}{\lambda_M} = \frac{85,69 \cdot 0,0075}{2} = 0,32.$$

Коефіцієнт масивності частинок шару:

$$m \approx 1 + \frac{Bi}{k_1 + 2} = 1 + \frac{0,32}{3 + 2} = 1,064.$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k_v = \frac{\alpha_v}{m} = \frac{13710}{1,064} = 12885 \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

Безрозмірні товщина шару і час нагрівання:

$$Y = \frac{k_v \cdot y}{C_r \cdot W_{r0}} = \frac{k_v \cdot H}{C_r \cdot W_{r0}} = \frac{12885 \cdot 0,1}{1000 \cdot 0,4} = 3,22;$$

$$Z = \frac{k_v \cdot \tau}{C_m \cdot \rho_m \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{12885 \cdot 8 \cdot 60}{1400 \cdot 3200 \cdot (1 - 0,6)} = 3,45.$$

Використовуючи графік Шумана (див. рис. 2.2), визначаємо відносну температуру матеріалу шару:  $\theta_m = \theta_m(Y, Z) = 0,45$ .

Розраховуємо температуру матеріалу:

$$t_m = t_{m0} + \theta_m \cdot (t_{r0} - t_{m0}) = 5 + 0,45 \cdot (450 - 5) = 205,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Використовуючи графік Шумана, наведений на рис. 2.1, визначаємо відносну температуру газу на виході із шару:  $\theta_r = \theta_r(Y, Z) = 0,63$ . Тоді температура газу на виході із шару:

$$t_r = t_{m0} + \theta_r \cdot (t_{r0} - t_{m0}) = 5 + 0,63 \cdot (450 - 5) = 285,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура газу значно змінюється по товщині шару, то необхідно обчислити її середнє значення і, використовуючи його, уточнити коефіцієнт тепловіддачі.

$$\bar{t}_r = 0,5 \cdot (t_{r0} + t_r) = 0,5 \cdot (450 + 285,4) = 367,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{W_{r0}^{0,9} \cdot (\bar{t}_r + 273)^{0,3}}{d^{0,75}} = 186 \cdot \frac{0,4^{0,9} \cdot (367,7 + 273)^{0,3}}{0,015^{0,75}} = 13222 \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

Далі, для уточнення отриманих результатів, необхідно повторно виконати розрахунок температури кусків матеріалу  $t_m$ :

$$\alpha_F = \alpha_v \cdot \frac{d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} = 13222 \cdot \frac{0,015}{6 \cdot (1 - 0,6)} = 82,64 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)};$$

$$Bi = \frac{\alpha_F \cdot R}{\lambda_M} = \frac{82,64 \cdot 0,0075}{2} = 0,31;$$

$$m \approx 1 + \frac{Bi}{k_1 + 2} = 1 + \frac{0,31}{3 + 2} = 1,062;$$

$$k_v = \frac{\alpha_v}{m} = \frac{13222}{1,062} = 12450 \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К)};$$

$$Y = \frac{k_v \cdot y}{C_r \cdot W_{r0}} = \frac{12450 \cdot 0,1}{1000 \cdot 0,4} = 3,11;$$

$$Z = \frac{k_v \cdot \tau}{C_M \cdot \rho_M \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{12450 \cdot 8 \cdot 60}{1400 \cdot 3200 \cdot (1 - 0,6)} = 3,44.$$

По графіку на рис. 2.2 визначаємо відносну температуру матеріалу шару

$$\theta_M = \theta_M(Y, Z) = 0,44$$

та розраховуємо його температуру:

$$t_M = t_{M0} + \theta_M \cdot (t_{r0} - t_{M0}) = 5 + 0,44 \cdot (450 - 5) = 201 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Задача 2.2.** Нерухомий шар товщиною  $H$ , складений з круглих частинок діаметром  $d$ , має шпаристість  $\varepsilon$ , початкову температуру шару  $t_{m0}$  та теплофізичні властивості матеріалу шару: густина  $\rho_m$ ; теплоємність  $C_m$ ; теплопровідність  $\lambda_m$ . Шар нагрівається потоком газу, який на вході в шар має температуру  $t_{г0}$  і швидкість у вільному перетині  $W_{г0}$ . Відомі теплофізичні властивості газу: теплоємність  $C_г$ ; кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu_г$ ; коефіцієнт теплопровідності газу  $\lambda_г$ . Визначити зміну температур матеріалу шару в часі через кожні 5 хвилин, при загальній тривалості процесу нагрівання  $\tau$  хвилин.

Вихідні дані до задачі 2.2 наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до задачі 2.2.

Номер варіанта	$\varepsilon$	$d$ , м	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_m$ , Дж/(кг·К)	$\lambda_m$ , Вт/(м·К)	$H$ , м	$t_{m0}$ , °C
1	0,4	0,020	3000	890	2,55	0,20	0
2	0,41	0,021	3050	871	2,55	0,21	0
3	0,42	0,022	3050	882	2,45	0,22	0
4	0,43	0,023	3100	873	2,45	0,23	0
5	0,44	0,024	3100	874	2,60	0,24	0
6	0,45	0,025	3150	875	2,60	0,23	0
7	0,46	0,026	3150	876	2,50	0,22	5
8	0,47	0,025	3200	877	2,50	0,21	5
9	0,48	0,024	3200	878	2,62	0,20	5
10	0,49	0,023	3200	879	2,62	0,22	20
11	0,50	0,022	3200	880	2,64	0,24	5
12	0,39	0,021	3150	881	2,64	0,26	20
13	0,51	0,020	3150	882	2,52	0,28	10
14	0,38	0,021	3150	883	2,52	0,30	10
15	0,47	0,024	3150	884	2,54	0,28	10
16	0,42	0,026	3100	885	2,54	0,26	10
17	0,50	0,025	3100	886	2,48	0,24	15
18	0,49	0,023	3100	876	2,45	0,22	15
19	0,48	0,021	3000	872	2,40	0,30	0
20	0,4	0,020	3000	878	2,50	0,20	0

Продовження табл. 2.2

Номер варіанта	$t_{г0},$ °C	$W_{г0},$ м/с	$C_{г},$ Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	$\nu_{г},$ м <sup>2</sup> /с	$\lambda_{г},$ Вт/(м·К)	$\tau,$ хвилин
1	700	0,40	1300	$40,62 \cdot 10^{-6}$	0,0425	25
2	600	0,41	1310	$40,63 \cdot 10^{-6}$	0,0426	30
3	600	0,42	1320	$40,64 \cdot 10^{-6}$	0,0427	25
4	500	0,43	1330	$40,65 \cdot 10^{-6}$	0,0428	30
5	700	0,44	1340	$40,66 \cdot 10^{-6}$	0,0429	25
6	700	0,45	1350	$40,67 \cdot 10^{-6}$	0,0430	30
7	600	0,46	1340	$40,68 \cdot 10^{-6}$	0,0431	25
8	500	0,47	1330	$40,69 \cdot 10^{-6}$	0,0430	30
9	550	0,48	1320	$40,68 \cdot 10^{-6}$	0,0429	25
10	550	0,49	1350	$40,67 \cdot 10^{-6}$	0,0428	30
11	650	0,50	1360	$40,66 \cdot 10^{-6}$	0,0427	25
12	650	0,51	1370	$40,65 \cdot 10^{-6}$	0,0426	30
13	650	0,52	1380	$40,64 \cdot 10^{-6}$	0,0425	25
14	550	0,53	1370	$40,63 \cdot 10^{-6}$	0,0424	30
15	550	0,54	1360	$40,62 \cdot 10^{-6}$	0,0423	25
16	500	0,55	1350	$40,60 \cdot 10^{-6}$	0,0424	30
17	600	0,56	1340	$40,71 \cdot 10^{-6}$	0,0425	25
18	700	0,57	1330	$40,75 \cdot 10^{-6}$	0,0426	30
19	600	0,58	1320	$40,85 \cdot 10^{-6}$	0,0427	25
20	500	0,50	1310	$40,61 \cdot 10^{-6}$	0,0427	25

Розв'язок задачі 2.2 розглянемо для вихідних даних варіанта 20.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі розрахуємо число Рейнольдса:

$$Re = \frac{W_{г0} \cdot d}{\nu_{г}} = \frac{0,5 \cdot 0,02}{40,61 \cdot 10^{-6}} = 246.$$

Оскільки значення числа Рейнольдса більше 200, вибираємо відповідну формулу для визначення числа Нуссельта:

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67} = 0,61 \cdot 246^{0,67} = 24,2$$

і розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до одиниці площі поверхні матеріалу:

$$\alpha_F = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{d} = 24,2 \cdot \frac{0,0427}{0,02} = 52,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Число Біо:

$$\text{Bi} = \frac{\alpha_F \cdot \frac{d}{2}}{\lambda_M} = \frac{52,1 \cdot \frac{0,02}{2}}{2,5} = 0,208.$$

Оскільки значення числа Біо менше 0,25, то частинки матеріалу, що нагріваються, поведуться як термічно тонкі тіла, тому при виконанні подальших розрахунків поправку на масивність не враховуємо.

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_v = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \alpha_F}{d} = \frac{6 \cdot (1 - 0,4) \cdot 52,1}{0,02} = 9389 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Розраховуємо безрозмірний час:

$$Z = \frac{\alpha_v \cdot \tau}{C_M \cdot \rho_M \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{9380 \cdot \Delta\tau \cdot n}{878 \cdot 1000 \cdot 3000 \cdot (1 - 0,4)} = 0,356 \cdot \Delta\tau \cdot n,$$

де  $\tau = \Delta\tau \cdot n$  – поточний час.

Приймаємо  $\Delta\tau = 5$  хвилин  $= 5 \cdot 60 = 300$  с та для  $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ , розраховуємо значення  $Z$ . Результати розрахунку заносимо до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку безрозмірного часу  $Z$

$\tau$ , хвилин	0	5	10	15	20	25
$Z$	0	1,78	3,56	5,34	7,12	8,9

Безрозмірна координату всього шару:



$$Y = \frac{\alpha_v \cdot H}{C_T \cdot W_{r0}} = \frac{9380 \cdot 0,2}{1310 \cdot 0,5} = 2,864.$$

Для визначення температури матеріалу по висоті шару розбиваємо його на декілька ділянок з кроком  $\Delta h = 0,05$  м. Тоді безрозмірна координата (висота) шару для кожної ділянки прийме такі значення:

$$Y = \frac{\alpha_v \cdot y}{C_T \cdot W_{r0}} = \frac{9380 \cdot \Delta h \cdot i}{1310 \cdot 0,5} = 14,321 \cdot \Delta h \cdot i,$$

де  $y = \Delta h \cdot i$  – поточна координата шару, м.

Приймаючи  $i = 0, 1, 2, 3, 4$ , розраховуємо значення поточної та безрозмірної координат шару. Результати розрахунку приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку безрозмірної координати шару  $Y$

у, м	0	0,05	0,10	0,15	0,20
Y	0	1,716	1,432	2,148	2,864

Використовуючи графіки, приведені на рис. 2.1 і 2.2, знаходимо відносну температуру матеріалу шару для обраних значень  $Z$  і  $Y$ , а потім за допомогою формул (2.10) – (2.11) обчислюємо значення температур в цих точках шару.

Результати розрахунків температур зводимо в таблиці 2.5 і 2.6 та наводимо у вигляді температурної діаграми (див. рис. 2.3).

Таблиця 2.5 – Відносні температури шару ( $\theta_m$ )

Y	Z					
	0	1,78	3,56	5,34	7,12	8,9
0	0	0,830	0,976	0,990	1,0	1,0
1,716	0	0,625	0,865	0,960	0,980	0,995
1,432	0	0,460	0,765	0,915	0,960	0,980
2,148	0	0,330	0,662	0,835	0,930	0,965
2,864	0	0,220	0,552	0,750	0,885	0,950

Таблиця 2.6 – Розрахункові значення температур шару ( $t_m$ , °C)

h, м	$\tau$ , ХВИЛИН					
	0	5	10	15	20	25
0	0	450	487	495	500	500
0,05	0	313	432	480	490	497
0,10	0	230	383	457	480	490
0,15	0	165	331	418	465	483
0,20	0	110	276	375	443	475

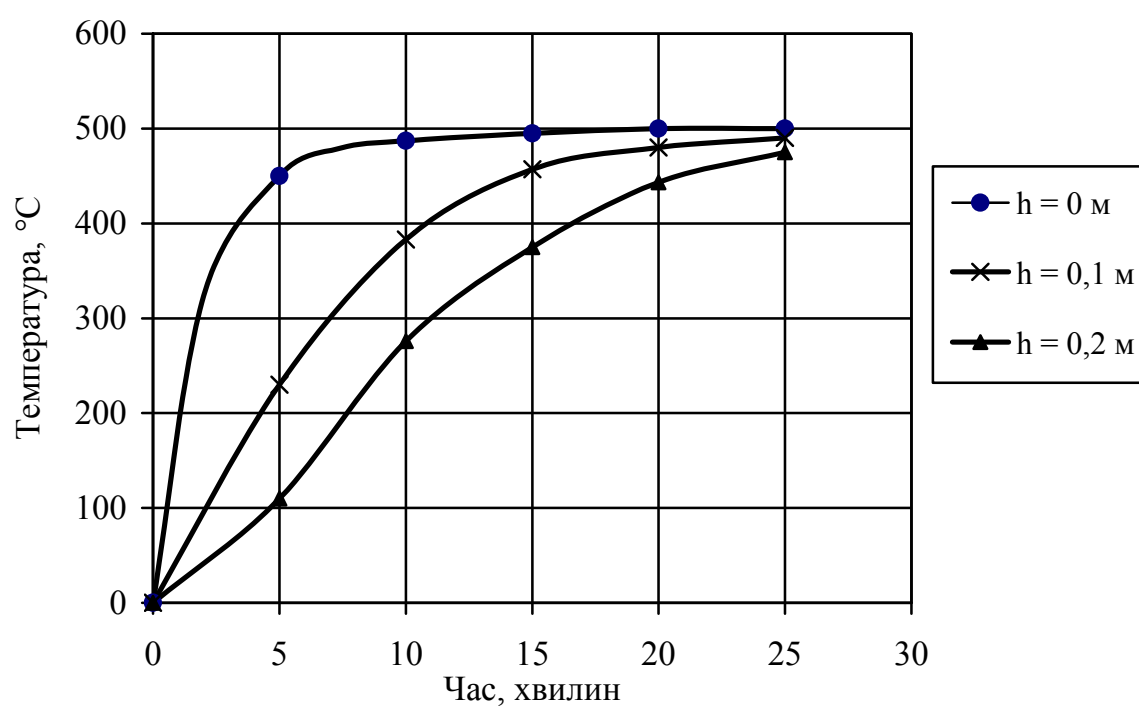


Рисунок 2.3 – Температурна діаграма шару

### 3 ТЕПЛООБМІН В ШАРІ, ЩО РУХАЄТЬСЯ

#### 3.1 Теоретичні відомості

Теплообмін в шарі, що рухається, зустрічається, наприклад, при нагріванні або охолодженні шихтових матеріалів в шахтних і обертових печах, шахтних теплообмінниках та інших пристроях. В якості теплоносія при нагріванні зазвичай використовуються продукти згоряння палива, а при охолодженні – атмосферне повітря. Якщо газ і матеріали рухаються в одному напрямку, то має місце проточечія, а якщо в протилежних, то протитечія.

Під час розгляду теплообмінних процесів в протитечії зазвичай приймають наступні припущення:

- матеріал, який нагрівається, являє собою щільний шар, що складається з однорідних кусків середнього діаметра  $d$ ;
- шар рухається в шахті постійного поперечного перерізу, при постійній масовій витраті матеріалу  $G_m$ ;
- температура матеріалу шару на вході в шахту ( $t_{m0}$ ) не змінюється;
- назустріч шару матеріалу, з протилежного боку, в шахту безперервно надходить газ з температурою  $t_{r0}$  і витратою  $V_r$ ;
- теплообмін між газом і частинками шару здійснюється лише конвекцією, причому коефіцієнт тепловіддачі є постійним у всьому об'ємі шару;
- в шарі має місце стаціонарний тепловий стан.

Під час розрахунку теплообміну в проточечії приймають аналогічні припущення, але припускають, що газ надходить в шахту з тієї ж сторони, що і нагріваються матеріали.

Теплообмін в проточечії та протитечії залежить від відношення водяних чисел матеріалу і газу:

$$W = \frac{G_m \cdot C_m}{V_r \cdot C_r}, \quad (3.1)$$

де  $C_M$  и  $C_\Gamma$  – питомі теплоємності газу и матеріалу.

Для протитечії відносні температури газу и матеріалу розраховують за формулами:

$$\theta_\Gamma = \frac{1 - W \cdot \exp\left[Y \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}{1 - W \cdot \exp\left[Y_0 \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}; \quad (3.2)$$

$$\theta_M = \frac{1 - \exp\left[Y \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}{1 - W \cdot \exp\left[Y_0 \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}, \quad (3.3)$$

де  $Y = \frac{\alpha_v \cdot F}{V_\Gamma \cdot C_\Gamma} \cdot y$  – безрозмірна координата по висоті шару;

$Y_0 = \frac{\alpha_v \cdot F}{V_\Gamma \cdot C_\Gamma} \cdot H$  – безрозмірна координата, яка відповідає максимальній

висоті шару;

$\theta_\Gamma = \frac{t_\Gamma - t_{M0}}{t_{\Gamma0} - t_{M0}}$  – відносна температура газу;

$\theta_M = \frac{t_M - t_{M0}}{t_{\Gamma0} - t_{M0}}$  – відносна температура матеріалу шару;

$\alpha_v$  – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі, який може бути визначений аналогічно коефіцієнту тепловіддачі в нерухомому шарі за формулами Б.І. Китаєва (2.1) або В.М. Тимофєєва (2.2).

Для прямотечії відносні температури газу і матеріалу розраховуються як:

$$\theta_\Gamma = \frac{1 + W \cdot \exp\left[-Y \cdot \frac{(W+1)}{W}\right]}{1 + W}; \quad (3.4)$$

$$\theta_m = \frac{1 - \exp\left[-Y \cdot \frac{(W+1)}{W}\right]}{1+W}, \quad (3.5)$$

Температури газу і матеріалу:

$$t_r = t_{m0} + \theta_r \cdot (t_{r0} - t_{m0}), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.6)$$

$$t_m = t_{m0} + \theta_m \cdot (t_{r0} - t_{m0}), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.7)$$

Зі зростанням відносної товщини шару (тобто висоти шахти) температури газу і матеріалу прагнуть досягти умовної температури, значення якої можна визначити за формулою:

$$t_y = \frac{t_{r0} + W \cdot t_{m0}}{1+W}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.8)$$

### 3.2 Приклади розрахунків теплообміну в шарі, що рухається

**Задача 3.1.** В шахтний протитечійний теплообмінник висотою  $H$  і площею перетину  $F$  зверху безперервно з витратою  $G_m$  завантажуються матеріал, що складається з кусків діаметром  $d$ . Відома шпаристість шару  $\epsilon$ , початкова температура матеріалу  $t_{m0}$  і теплофізичні властивості матеріалу: густина  $\rho_m$ ; теплоємність  $C_m$ ; теплопровідність  $\lambda_m$ . Знизу в теплообмінник безперервно надходить газ з витратою  $V_r$  і температурою  $t_{r0}$ . Теплоємність газу –  $C_r$ . Визначити температури матеріалу і газу, з якими обидва теплоносія залишають теплообмінник.

Вихідні дані до задачі 3.1 приведені в табл. 3.1.

Розв'язання задачі 3.1 розглянемо для вихідних даних варіанта 20.

Розрахуємо швидкість газу у вільному перетині шару:

$$W_{r0} = \frac{V_r}{F} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2 \text{ м/с}.$$

Таблиця 3.1 – Вихідні данні до задачі 3.1

Номер варіанта	H, м	F, м <sup>2</sup>	G <sub>м</sub> , кг/с	d, см	ε	ρ <sub>м</sub> , кг/м <sup>3</sup>
1	0,31	0,45	0,15	2,8	0,55	2300
2	0,32	0,46	0,17	2,85	0,5	2400
3	0,33	0,47	0,18	2,95	0,45	2500
4	0,34	0,48	0,19	2,9	0,6	2600
5	0,35	0,49	0,2	2,95	0,55	2700
6	0,36	0,5	0,19	3,0	0,5	2800
7	0,37	0,51	0,18	3,05	0,45	2750
8	0,38	0,52	0,17	3,1	0,4	2650
9	0,39	0,53	0,16	3,15	0,6	2550
10	0,4	0,54	0,15	3,2	0,55	2450
11	0,39	0,55	0,14	3,25	0,5	2350
12	0,38	0,54	0,14	3,3	0,45	2250
13	0,37	0,53	0,17	3,35	0,4	2200
14	0,36	0,52	0,18	3,4	0,45	2300
15	0,35	0,51	0,19	3,3	0,5	2400
16	0,34	0,5	0,12	3,2	0,55	2500
17	0,33	0,49	0,12	3,1	0,6	2600
18	0,32	0,48	0,10	2,8	0,5	2700
19	0,31	0,49	0,15	2,9	0,4	2400
20	0,3	0,5	0,16	3	0,5	2500

Продовження табл. 3.1

Номер варіанта	C <sub>м</sub> , Дж/(кг·К)	λ <sub>м</sub> , Вт/(м·К).	t <sub>м0</sub> , °C	t <sub>г0</sub> , °C	V <sub>г</sub> , м <sup>3</sup> /с	C <sub>г</sub> , Дж/(м <sup>3</sup> ·К)
1	1000	2,4	0	700	0,11	1200
2	1100	2,0	10	800	0,12	1000
3	1050	2,5	20	850	0,13	1100
4	1100	2,2	30	750	0,14	1200
5	1000	2,0	40	1000	0,15	1300
6	950	2,4	50	950	0,14	1000
7	1200	2,5	60	850	0,13	1100

Продовження табл. 3.1

Номер варіанта	$C_m$ , Дж/(кг·К)	$\lambda_m$ , Вт/(м·К).	$t_{m0}$ , °С	$t_{r0}$ , °С	$V_r$ , м³/с	$C_r$ , Дж/(м³·К)
8	950	2,2	5	1000	0,12	1300
9	1000	2,6	15	750	0,11	1200
10	1200	2,0	25	950	0,1	1000
11	1100	2,5	35	1050	0,11	1300
12	900	2,4	45	850	0,12	1100
13	1000	2,0	55	900	0,13	1200
14	950	2,6	45	1050	0,14	1000
15	1050	2,2	35	900	0,15	1300
16	1050	2,6	25	800	0,14	1400
17	1100	2,0	15	800	0,13	1200
18	900	2,5	5	700	0,12	1300
19	1050	2,2	0	700	0,11	1200
20	1000	2,0	40	750	0,1	1000

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{W_{r0}^{0,9} \cdot T_{r0}^{0,3}}{d^{0,75}} = 186 \cdot \frac{0,2^{0,9} \cdot (750 + 273)^{0,3}}{0,03^{0,75}} = 4848 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тоді поверхневий коефіцієнт тепловіддачі складе:

$$\alpha_F = \alpha_v \cdot \frac{d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} = 4848 \cdot \frac{0,03}{6 \cdot (1 - 0,5)} = 48,48 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha_F \cdot R}{\lambda_m} = \frac{48,48 \cdot 0,015}{2} = 0,364,$$

де  $R = d/2 = 3/2 = 1,5 \text{ см} = 0,015 \text{ м}$ .

Коефіцієнт масивності кусків сферичної форми:

$$m \approx 1 + \frac{Bi}{k_1 + 2} = 1 + \frac{0,364}{3 + 2} = 1,073.$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k_v = \frac{\alpha_v}{m} = \frac{4848}{1,073} = 4519,3 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Відношення водяних еквівалентів матеріалу й газу:

$$W = \frac{G_M \cdot C_M}{V_r \cdot C_r} = \frac{0,16 \cdot 1000}{0,1 \cdot 1000} = 1,6.$$

Відносна висота шару:

$$Y_0 = \frac{k_v \cdot H}{W_{r0} \cdot C_r} = \frac{4519,3 \cdot 0,3}{0,2 \cdot 1000} = 6,779.$$

Відносна температура матеріалу:

$$\theta_M = \frac{1 - \exp\left[Y_0 \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}{1 - W \cdot \exp\left[Y_0 \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]} = \frac{1 - \exp\left[6,779 \cdot \frac{(1,6-1)}{1,6}\right]}{1 - 1,6 \cdot \exp\left[6,779 \cdot \frac{(1,6-1)}{1,6}\right]} = 0,606.$$

Температура матеріалу на виході зі шару:

$$t_M = t_{M0} + \theta_M \cdot (t_{M0} - t_{r0}) = 40 + (750 - 40) \cdot 0,606 = 470^\circ \text{C}.$$

Відносна температура газу:

$$\theta_r = \frac{1 - W \cdot \exp\left[Y \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]}{1 - W \cdot \exp\left[Y_0 \cdot \frac{(W-1)}{W}\right]} = \frac{1 - 1,6 \cdot \exp\left[0 \cdot \frac{(1,6-1)}{1,6}\right]}{1 - 1,6 \cdot \exp\left[6,779 \cdot \frac{(1,6-1)}{1,6}\right]} = 0,031,$$



де  $Y = \frac{\alpha_v \cdot F}{V_r \cdot C_r} \cdot y = 0$  – безрозмірна координата шару, яка відповідає

місцю входу матеріалу в шахтний теплообмінник.

Температура газу на виході зі шару:

$$t_r = t_{m0} + \theta_r \cdot (t_{r0} - t_{m0}) = 40 + (750 - 40) \cdot 0,031 = 62 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

**Задача 3.2.** У шахтний прямотечійний теплообмінник висотою  $H$  і діаметром  $D$  зверху безперервно з витратою  $G_m$  завантажується матеріал, що складається з кусків діаметром  $d$ . Відомі: шпаристість шару  $\varepsilon$ ; густина матеріалу  $\rho_m$ ; теплоємність матеріалу  $C_m$ ; теплопровідність матеріалу  $\lambda_m$ ; початкова температура матеріалу  $t_{m0}$ . Зверху в теплообмінник безперервно надходить газ з витратою  $V_r$ , температурою  $t_{r0}$ , теплоємністю газу  $C_r$ . Визначити температури газу й матеріалу на виході з теплообмінника.

Вихідні дані до задачі 3.2 наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до задачі 3.2.

Номер варіанта	$H$ , м	$D$ , м	$G_m$ , кг/с	$d$ , см	$\varepsilon$	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>
1	1,0	0,4	1,00	4	0,41	2700
2	1,0	0,41	1,10	5	0,42	2700
3	1,0	0,42	1,20	4	0,43	2650
4	1,0	0,43	1,05	5	0,44	2650
5	1,0	0,44	1,15	4	0,45	2600
6	0,8	0,45	1,00	5	0,46	2600
7	0,8	0,44	1,10	6	0,47	2550
8	0,8	0,43	1,20	5	0,48	2550
9	0,8	0,42	1,05	6	0,49	2500
10	0,8	0,41	1,15	4	0,5	2500
11	1,2	0,4	1,00	6	0,49	2550
12	1,2	0,38	1,10	4	0,48	2550
13	1,2	0,39	1,20	5	0,47	2600
14	1,2	0,38	1,05	5	0,46	2600

Продовження табл. 3.2

Номер варіанта	H, м	D, м	G <sub>м</sub> , кг/с	d, см	ε	ρ <sub>м</sub> , кг/м <sup>3</sup>
15	1,2	0,41	1,15	5	0,45	2650
16	1,4	0,42	0,95	6	0,44	2650
17	1,4	0,43	0,9	4	0,43	2700
18	1,4	0,44	0,95	6	0,42	2450
19	1,4	0,45	1,05	4	0,41	2400
20	0,8	0,4	1	5	0,4	2500

Продовження табл. 3.2

Номер варіанта	C <sub>м</sub> , Дж/(кг·K)	λ <sub>м</sub> , Вт/(м·K).	t <sub>м0</sub> , °C	t <sub>г0</sub> , °C	V <sub>г</sub> , м <sup>3</sup> /с	C <sub>г</sub> , Дж/(м <sup>3</sup> ·K)
1	1050	1,9	0	800	0,4	1800
2	1050	1,9	5	790	0,39	1790
3	1050	1,9	10	780	0,38	1780
4	1100	1,8	15	770	0,37	1770
5	1100	1,8	20	760	0,36	1760
6	1150	1,8	25	750	0,35	1750
7	1150	1,95	30	740	0,34	1740
8	1000	1,95	35	730	0,33	1730
9	1000	1,95	40	720	0,32	1720
10	950	1,95	45	710	0,31	1710
11	950	2,0	50	700	0,3	1700
12	900	2,0	45	810	0,29	1690
13	900	2,0	40	820	0,28	1680
14	950	2,05	35	830	0,27	1670
15	950	2,05	30	840	0,26	1660
16	1000	2,05	25	850	0,25	1650
17	1000	2,1	20	840	0,275	1640
18	1050	2,1	15	830	0,285	1630
19	1050	2,15	10	820	0,295	1620
20	1000	2	30	550	0,3	1600

Розв'язок задачі 3.2 розглянемо для вихідних даних варіанта 20.

Площа поперечного перерізу шару:

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 0,126 \text{ м}^2.$$

Швидкість газу у вільному перетині шару:

$$W_{r0} = \frac{V_r}{F} = \frac{0,3}{0,126} = 2,387 \text{ м/с}.$$

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{W_{r0}^{0,9} \cdot T_{r0}^{0,3}}{d^{0,75}} = 186 \cdot \frac{2,387^{0,9} \cdot (550 + 273)^{0,3}}{0,05^{0,75}} = 28842 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тоді поверхневий коефіцієнт тепловіддачі складе:

$$\alpha_F = \alpha_v \cdot \frac{d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} = 28842 \cdot \frac{0,05}{6 \cdot (1 - 0,4)} = 400,58 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha_F \cdot R}{\lambda_m} = \frac{400,58 \cdot 0,025}{2} = 5,01,$$

де  $R = d/2 = 5/2 = 2,5 \text{ см} = 0,025 \text{ м}$ .

Коефіцієнт масивності кусків сферичної форми:

$$m \approx 1 + \frac{Bi}{k_1 + 2} = 1 + \frac{5,01}{3 + 2} = 2,002 \approx 2.$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k_v = \frac{\alpha_v}{m} = \frac{28842}{2} = 14410,5 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Відношення водяних еквівалентів матеріалу й газу:

$$W = \frac{G_M \cdot C_M}{V_\Gamma \cdot C_\Gamma} = \frac{1 \cdot 1000}{0,3 \cdot 1600} = 2,083.$$

Відносна висота шару:

$$Y_0 = \frac{k_v \cdot H}{W_{\Gamma 0} \cdot C_\Gamma} = \frac{14410,5 \cdot 0,8}{2,387 \cdot 1600} = 3,018.$$

Відносні температури матеріалу і газу на виході з шару:

$$\theta_M = \frac{1 - \exp\left[-Y_0 \cdot \frac{(W+1)}{W}\right]}{1+W} = \frac{1 - \exp\left[-3,018 \cdot \frac{2,083+1}{2,083}\right]}{1+2,083} = 0,321;$$

$$\theta_\Gamma = \frac{1 + W \cdot \exp\left[-Y_0 \cdot \frac{(W+1)}{W}\right]}{1+W} = \frac{1 + 2,083 \cdot \exp\left[-3,018 \cdot \frac{(2,083+1)}{2,083}\right]}{1+2,083} = 0,332.$$

Температури матеріалу й газу на виході з шару:

$$t_M = t_{M0} + \theta_M \cdot (t_{\Gamma 0} - t_{M0}) = 30 + (550 - 30) \cdot 0,321 = 196,7^\circ\text{C}.$$

$$t_\Gamma = t_{M0} + \theta_\Gamma \cdot (t_{\Gamma 0} - t_{M0}) = 30 + (550 - 30) \cdot 0,332 = 202,7^\circ\text{C}.$$

## **4 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**

### **«РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ШАРІ»**

1. Для вихідних даних, наведених в таблицях 2.1, 2.2, 3.1, знайдіть розв'язки задач 2.1, 2.2, 3.1.

2. Для вихідних даних задачі 3.2 (див. табл. 3.2) виконайте розрахунок зміни температур газу й матеріалу по висоті шару. Результати розрахунку зведіть до таблиць та наведіть у вигляді графіка зміни температур газу й матеріалу в процесі теплообміну.

3. Звіт про виконання індивідуального завдання повинен містити:

- номер варіанта;
- постановку задачі 2.1, вихідні дані і розв'язок задачі;
- постановку задачі 2.2, вихідні дані і розв'язок задачі, таблиці з результатами розрахунків безрозмірних величин часу, координати і температури шару, графік зміни температури матеріалу в процесі теплообміну;
- постановку задачі 3.1, вихідні дані і розв'язок задачі;
- постановку задачі 3.2, вихідні дані і розв'язок задачі, результати розрахунку температур газу і матеріалу для шести координат по висоті шару, представлених у вигляді таблиці, та графік зміни температур газу і матеріалу в процесі теплообміну.

## 5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які основні допущення приймають при виконанні розрахунків теплообміну в нерухомому або рухомому шарі?
2. Яким параметром характеризується термічна масивність частинок шару?
3. Яка величина характеризує щільність шару?
4. Який шар можна вважати щільним?
5. Чому під час розрахунків теплообміну використовується об'ємний коефіцієнт тепловіддачі?
6. Приведіть формули за якими розраховуються об'ємні коефіцієнти тепловіддачі?
7. Як розраховується коефіцієнт теплопередачі і з якою метою його використовують в розрахунках процесів теплообміну в шарі?
8. Дайте визначення коефіцієнту масивності тіла?
9. За якою формулою розраховується коефіцієнт масивності?
10. Чому дорівнюють коефіцієнти форми нескінченної пластини, нескінченного циліндра й кулі?
11. За якою формулою визначаються числа Нуссельта і Біо?
12. З якою метою під час виконання індивідуального завдання використовуються графіки Шумана.
13. Дайте порівняльну характеристику нагріванню матеріалів в прямотечії та протитечії. Намалюйте якісну картину зміни температурних полів обох теплоносіїв (газу та матеріалу).
14. За якою формулою можна визначити відношення водяних чисел матеріалу й газу?
15. Чи можна нагріти матеріал до початкової температури газу за рахунок інтенсифікації теплообміну в шарі? Обґрунтуйте відповідь.
16. В теорії теплообміну в шарі, що рухається, використовується поняття умовної температури. За якою формулою вона обраховується? Який фізичний смисл має ця величина?

## ЗМІСТ

	стр
ВСТУП	3
1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ»	4
2 ТЕПЛООБМІН В НЕРУХОМОМУ ШАРІ	12
2.1 Теоретичні відомості	12
2.2 Приклади розрахунків теплообміну в нерухомому шарі	17
3 ТЕПЛООБМІН В ШАРІ, ЩО РУХАЄТЬСЯ	26
3.1 Теоретичні відомості	26
3.2 Приклади розрахунків теплообміну в шарі, що рухається	28
4 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ «РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ШАРІ»	36
5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	37