

**Методичні вказівки**  
**до самостійної роботи студентів з дисципліни**  
**«Тепломасообмін і гідродинаміка**  
**багатокомпонентних середовищ»**  
**для студентів денної та заочної форм навчання**  
**спеціальності – «Теплоенергетика»**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

## **Методичні вказівки**

**до самостійної роботи студентів з дисципліни**

**«Тепломасообмін і гідродинаміка  
багатокомпонентних середовищ»**

**для студентів денної та заочної форм навчання  
спеціальності – «Теплоенергетика»**

Вінниця  
ВНТУ  
2018

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 29.03.2017 р.)

Рецензенти:

**М. М. Чепурний**, кандидат технічних наук, професор

**І. В. Коц**, кандидат технічних наук, професор

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності – «Теплоенергетика» / Уклад. С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 52 с.

У методичних вказівках розглянуті питання виконання студентами-теплоенергетиками самостійної роботи з дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» на теми: грубодисперсні системи, гідродинаміка систем гідрота пневмотранспортування частинок, характеристики двофазних газорідних потоків в котлоагрегатах та випарних апаратах, особливості тепло- і масообміну в багатокомпонентних середовищах.

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	4
1 НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ .....	5
2 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ .....	8
3 ГРУБОДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ .....	8
3.1 Приклади розв'язання задач .....	8
3.2 Задачі для самостійної роботи .....	13
4 ДВОФАЗНІ ТЕЧІЇ .....	17
4.1 Приклади розв'язання задач .....	17
4.2 Задачі для самостійної роботи .....	20
5 ТЕПЛО- І МАСООБМІН В ДВОКОМПОНЕНТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ .....	27
5.1 Приклади розв'язання задач .....	27
5.2 Задачі для самостійної роботи .....	39
ЛІТЕРАТУРА .....	43
Додаток А .....	44
Додаток Б .....	45
Додаток В .....	51

## ПЕРЕДМОВА

Дані методичні вказівки призначені для студентів денної та заочної форм навчання напряму підготовки «Теплоенергетика». Методичні вказівки підготовлені відповідно до навчального плану та навчальної програми дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатоконпонентних середовищ».

Викладений матеріал дозволить студентам готуватись до практичних занять, виконувати розрахунки в рамках підготовки бакалаврських та дипломних робіт.

Значна кількість прикладів із розв'язанням та завдань дозволить якісно організувати самостійну роботу студентів.

Значна увага приділяється двофазним потокам в елементах котельного та теплотехнологічного обладнання, оскільки надійність та ефективність роботи таких систем визначається гідродинамікою пароводяних потоків в цих елементах.

Авторами розглянуті особливості гідродинаміки процесів гідро- і пневмотранспортування та процесів тепломасообміну між повітрям і вільною поверхнею рідини, конденсації водяної пари з парогазової суміші, що мають розповсюдження в інженерній практиці.

Для зручності роботи студента в посібнику зосереджена достатня кількість довідкового матеріалу.

Автори вдячні рецензентам за корисні поради і зауваження в процесі рецензування і підготовки рукопису.

Автори

# 1 НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Програма вивчення навчальної дисципліни складена з урахуванням вимог освітньо-професійних програм підготовки *бакалаврів* за спеціальністю *Теплоенергетика*.

**Предметом** вивчення навчальної дисципліни «Тепломасообмін та гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» є фізичні процеси в багатокомпонентних середовищах; методи математичного моделювання, методи розрахунків, наукових досліджень.

**Міждисциплінарні зв'язки.** Вивчення дисципліни «Тепломасообмін та гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» базується на матеріалах таких дисциплін: математика, фізика, гідрогазодинаміка, технічна термодинаміка, тепломасообмін тощо. Дисципліна дозволяє поглибити вивчення таких дисциплін: теплотехнологічні процеси та установки, сушильні процеси та установки, високотемпературні процеси та установки, промислові печі та пічне устаткування, кондиціювання повітря, проектування теплоенергетичних та теплотехнічних установок, експлуатація, випробування та налагодження теплоенергетичного і теплотехнологічного обладнання.

Програма навчальної дисципліни складається з таких змістових модулів:

**Змістовий модуль 1. Гідрогазодинаміка багатокомпонентних, багатofазних середовищ.**

**Змістовий модуль 2. Тепломасообмін і фазові переходи в багатокомпонентних, багатofазних середовищах.**

## Мета та завдання навчальної дисципліни

1.1 Мета викладання навчальної дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» – надати студентам необхідні теоретичні та практичні знання про особливості тепломасообміну та гідродинаміки багатокомпонентних середовищ, про методи розрахунку при реалізації їх в теплотехнологічному обладнанні.

1.2 Основними завданнями вивчення дисципліни «Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ» є:

- розуміння фізичних процесів в багатокомпонентних середовищах;
- засвоєння методів математичного моделювання, методів розрахунків, наукових досліджень.

1.3 Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

- *знати* об'єкт вивчення; основні і суміжні проблеми; одномірні полікомпонентні, поліфазні течії – рівняння імпульсу, енергії, гомогенної течії; дійсні та витратні параметри двофазних течій, методи їх визначення; механізм робочих процесів в парогенеруючих каналах та методи їх розрахунків; тепло- і масообмін в двокомпонентних середовищах, двофазних середовищах;

– *вміти* виконувати інженерно-технічні розрахунки; аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами розрахунків; користуватись науковою, довідковою та нормативною літературою; знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань.

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 108 годин, 3 кредити ECTS.

## **Інформаційний обсяг навчальної дисципліни**

### **Змістовий модуль 1. Гідрогазодинаміка багатоконпонентних, багатозфазних середовищ**

#### **Тема 1. Вступ. Об'єкт та область вивчення. Основні і суміжні проблеми**

Однофазні полікомпонентні середовища: розчини (газові суміші). Двофазні середовища: однокомпонентні, двокомпонентні, полікомпонентні. Трифазні середовища: однокомпонентні, двокомпонентні, полікомпонентні. Характеристики, параметри полікомпонентних, поліфазних середовищ. Методи розрахунку складу суміші газів, складу розчинів.

#### **Тема 2. Грубодисперсні системи**

Ступінь проточності грубодисперсних систем, основні класи, застосування. Структура потоку при пневмотранспортуванні. Транспортування частинки, швидкість зависання і її визначення.

Основи розрахунків дисперсних середовищ: основні характеристики дисперсних потоків – концентрація, геометрична і гідравлічна крупність, критична швидкість; втрати тиску дисперсних потоків. Гідравлічний розрахунок трубопроводів гідротранспортування і пневмотранспортування.

Фільтрація: фільтраційна витрата, швидкість фільтрації, пористість, закон Дарсі.

#### **Тема 3. Двофазні багатоконпонентні течії і середовища, гідродинаміка**

Двофазні течії в теплоенергетичному та теплотехнологічному обладнанні. Методи подібності. Основні розмірні параметри газорідної суміші. Визначаючі і визначаємі параметри.

Усереднені дійсні і витратні параметри газорідної суміші: приведені швидкості рідини і газу, витратна швидкість суміші, характерна швидкість двофазної течії (швидкість циркуляції); об'ємний витратний  $\beta$  і дійсний газовміст потоку  $\phi$ , їх відмінність середня витратна і дійсна густина суміші; дійсні середні швидкості фаз, середня відносна швидкість фаз.

Режими течії горизонтальних і вертикальних двофазних потоків. Механічна і теплова взаємодія на межі поділу фаз. Хвильові явища на поверхні розділу фаз.

Одномірні полікомпонентні поліфазні течії.

Рівняння суцільності. Рівняння імпульсу і енергії для одної фази. Баланс імпульсу і енергії для двофазної полікомпонентної системи: рівняння імпульсу, рівняння енергії, рівняння гомогенної течії. Зв'язок рівняння імпульсу і енергії. Вступ до критичних течій. Інтегральна форма рівняння імпульсу.

Дійсний газовміст, опір по довжині каналу, місцеві опори, втрати на прискорення, методи розрахунку. Взаємозв'язок руху і фазових переходів в парорідинних потоках (водяна пара + розчин). Методи оцінювання впливу нерівноважності потоку на його рух. Приклади розрахунку витратних характеристик двофазних течій.

Контур з природною циркуляцією, математична модель гідродинамічних процесів. Канали з вимушеною двофазною течією. Швидкість звуку в двофазних потоках, критичні параметри. Трансзвукові течії.

#### **Тема 4. Методи подібності**

Критерії подібності, які визначають дійсні характеристики двофазних течій. Особливості вивчення характеристик двофазних течій.

### ***Змістовий модуль 2. Тепломасообмін і фазові переходи в багатоконпонентних, багатофазних середовищах***

#### **Тема 5. ТМО і гідродинаміка рідинних багатоконпонентних органічних сумішей**

Тепломасообмінні і гідродинамічні процеси в теплотехнологічних і біоенергетичних системах.

Теплофізичні параметри органічних сумішей. Теплообмінні процеси, режими, класифікація. Теплообмін в умовах вимушеної і природної конвекції, механізм, методи моделювання, розрахункові залежності.

Теорія подібності і експериментально-розрахунковий метод (EPM).

Приклади розрахунків тепломасообміну в теплотехнологічній системі біоконверсії.

#### **Тема 6. Двофазні течії, теплообмін**

Механізм розвитку кризових явищ в парогенерувальних каналах при низькому тиску і вакуумі. Методи розрахунку тепловіддачі.

Тепловіддача до двофазних потоків в круглих трубах, в кільцевих каналах. Криза теплообміну між стінкою круглої труби і двофазним потоком. Методи розрахунку тепловіддачі двофазних потоків. Математична модель теплогідродинамічних процесів в контурі з природною циркуляцією.

#### **Тема 7. Фазові переходи в системі «рідина – тверде тіло»**

Перехід рідкої фази у тверду, що має кристалічну структуру. Плавлення в паровому (газовому) середовищі: при відведенні плавкої рідини, при відсутності відведення плавкої рідини. Плавлення одиночного тіла в рідині при природній конвекції.



## **Тема 8. Тепло- і масообмін в двокомпонентних середовищах**

Основні поняття і закони. Дифузія: молекулярна (концентраційна), молярна. Густина потоку маси. Закон Фіка. Термічна дифузія (ефект Соре). Дифузійний термoeфект (ефект Дюфо). Бародифузія. Конвективний перенос маси. Сумарний перенос маси. Перенос ентальпії. Густина теплового потоку.

Тепло- і масовіддача. Випаровування рідини в парогазове середовище. Розподілення концентрації пари і газу на поверхні випаровування. Дифузійний граничний шар. Аналогія процесів теплообміну і масообміну.

Тепло- і масообмін при конденсації пари із парогазової суміші. Розподіл концентрації і температури. Густина теплового потоку. Термічні опори. Деякі поширені критеріальні рівняння для розрахунку процесу тепломасообміну.

## **2 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

Перед виконанням завдання для самостійної роботи необхідно ретельно ознайомитись із змістом лекційного матеріалу за даною темою, що наведений у [1]. Необхідно вивчити відповідні залежності і навчитись ними користуватись. Кожна тема містить приклад розв'язання типової задачі. Починаючи виконувати завдання для самостійної роботи, необхідно ретельно проаналізувати умову задачі, оцінити набір необхідних розрахункових залежностей, скласти порядок розрахунку або запозичити його у прикладі розв'язання. Необхідний для розв'язання довідковий матеріал вибрати із додатків до методичних вказівок або із наведених літературних джерел. Для полегшення засвоєння матеріалу в кінці кожної теми наведені контрольні запитання.

## **3 ГРУБОДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ**

### **3.1 Приклади розв'язання задач**

**Приклад 3.1** Визначити швидкість зависання в повітрі  $w_{\text{зав}}$  частинки, яка має форму кулі, якщо діаметр частинки  $d = 0,0001$  м; густина матеріалу частинки  $\rho_{\text{т.в.}} = 600$  кг/м<sup>3</sup>; температура повітря 10 °С.

Розв'язування

Знаходимо густину і в'язкість повітря при заданій температурі:

$$\rho_p = 1,20 \text{ кг/м}^3; \nu = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коефіцієнт опору тиску визначаємо за формулою

$$C_{d1} = 24/\text{Re} + 0,67 \sqrt{C_d}.$$

Маючи на увазі малий розмір частинки, в першому наближенні нехтуємо другим членом в цій формулі, тобто приймаємо

$$C_{d1} = \frac{24}{Re} = \frac{24 \cdot v}{w_{зав} \cdot d}.$$

Швидкість зависання знаходимо за формулою

$$w_{зав} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{d \cdot \rho_{т.в.}}{C_d \rho_p}}.$$

Підставивши значення  $C_{d1} = \frac{24 \cdot v}{w_{зав} \cdot d}$ , одержимо

$$w'_{зав} = 0,545 \cdot \frac{d^2 \cdot \rho_{т.в.}}{\nu \rho_p} = 0,545 \cdot \frac{0,0001^2 \cdot 600}{15,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2} = 0,18 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса, яке відповідає цій швидкості

$$Re_1 = \frac{w'_{зав} \cdot d}{\nu} = \frac{0,18 \cdot 0,0001}{15,2 \cdot 10^{-6}} = 1,19.$$

Уточнюємо значення коефіцієнта опору

$$C_{d2} = 24/1,19 + 0,67 \sqrt{C_{d2}} = 20,1 + 0,67 \sqrt{C_{d2}}$$

і маємо:  $C_{d2} = 25$ .

Швидкість зависання в другому наближенні

$$w''_{зав} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81}{3}} \cdot \sqrt{\frac{0,0001 \cdot 600}{25 \cdot 1,2}} \approx 0,16 \text{ м/с}.$$

Знаходимо число Рейнольдса і коефіцієнт опору, який відповідає цій швидкості

$$Re_2 = 0,16 \cdot 0,0001 / (15,2 \cdot 10^{-6}) = 1,06,$$

$$C_{d3} = 24/1,06 + 0,67 \sqrt{25} \approx 23,3.$$

Звідси швидкість зависання  $w'''_{зав} = 0,158 \text{ м/с}$ , що практично збігається з її попереднім значенням. Розрахунок завершено.

**Приклад 3.2** Гідросуміш транспортують по сталевому зварному трубопроводі довжиною  $l = 2000 \text{ м}$  і  $D = 0,5 \text{ м}$ . Масова концентрація твердої фази  $C_p = 0,1$ . Густина твердого матеріалу  $\rho_m = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Середній розмір частинок транспортованого матеріалу  $d = 10^{-3} \text{ м}$ .

Визначити витрату гідросуміші  $Q_{дф}$  і витрати тиску  $\Delta P_{дф}$ , якщо транспортування здійснюється за критичної швидкості. Температура гідросуміші 20 °С.

Розв'язування

Критичну швидкість знаходимо за формулою

$$V_{кр} = w_{зав} \sqrt[6]{C_p \cdot (D/d)^{3,5}}.$$

За табл. 10.2 [1] знаходимо  $w_{зав} = 0,09$  м/с. Тоді

$$V_{кр} = 0,09 \sqrt[6]{0,1(0,5/10^{-3})^{3,5}} = 3,35 \text{ м/с.}$$

Витрата гідросуміші

$$Q_{дф} = V\omega = V \cdot \pi \cdot D^2/4 = 3,35 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2/4 = 0,66 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Втрати тиску при русі двофазної рідини визначаємо за формулою

$$\Delta P_{дф} = \lambda_{дф} \frac{1}{D} \frac{V^2}{2} \rho_{дф},$$

де коефіцієнт гідравлічного тертя двофазної рідини знаходимо за формулою

$$\lambda_{дф} = \lambda(1 + \varphi c_p) \cdot \rho/\rho_{дф}.$$

Розраховуємо величини, що входять в ці формули. Масова концентрація

$$C_p = (\rho_d Q_d)/(\rho_p Q_p).$$

Враховуючи, що густина суміші

$$\rho_{дф} = \frac{M_{дф}}{Q_{дф}} = \frac{\rho_p Q_p + \rho_d Q_d}{Q_p + Q_d} = \left[ \rho_p + \frac{\rho_d Q_d}{Q_p} \left( \frac{\rho_p}{\rho_p} \right) \right] / \left[ 1 + \frac{Q_d}{Q_p} \left( \frac{\rho_d \rho_p}{\rho_p \rho_d} \right) \right],$$

Отримаємо

$$\rho_{дф} = (\rho_p + C_p \cdot \rho_p)/(1 + C_p \cdot \rho_p/\rho_d).$$

При густині води  $\rho_p = 998,2$  кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{дф} = \frac{998,2 + 0,1 \cdot 998,2}{1 + 0,1 \cdot 998,2/2600} = 1060 \text{ кг/м}^3.$$

Коефіцієнт  $\phi$  знаходимо за формулою Дюрана, приймаючи  $N = 190$

$$\phi = N \cdot \left( \frac{\sqrt{g \cdot D}}{V} \right)^3 \cdot \left( \frac{w_{\text{зав}}}{\sqrt{g \cdot d}} \right)^{1,5} = 190 \cdot \left( \sqrt{9,8 \cdot 0,5} / 3,35 \right)^3 \cdot \left( 0,09 / \sqrt{9,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,5} = 46,5.$$

Число Рейнольдса  $Re = 3,35 \cdot 0,5 / (1,01 \cdot 10^{-6}) = 1,67 \cdot 10^6$ .

При  $k_e = 5 \cdot 10^{-4}$  м (табл. 3.1 [2]) знаходимо

$$Re \cdot k_e / D = 1,67 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4} / 0,5 = 1670.$$

Отже, трубопровід працює в квадратичній області опору і коефіцієнт  $\lambda$  визначаємо за формулою Б. Л. Шифринсона

$$\lambda = 0,11(k_e/D)^{0,25} = 0,11(5 \cdot 10^{-4}/0,5)^{0,25} = 0,02$$

або за універсальною формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11(k_e/D + 68/Re)^{0,25} = 0,11(5 \cdot 10^{-4}/0,5 + 68/(1,67 \cdot 10^6))^{0,25} \approx 0,02.$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного тертя при русі гідросуміші

$$\lambda_{\text{дф}} = 0,02(1 + 46,5 \cdot 0,1) \cdot 998,2 / 1060 = 0,106.$$

Втрати тиску при русі гідросуміші

$$\Delta P_{\text{дф}} = 0,106 \frac{2000}{0,5} \cdot \frac{3,35^2}{2} \cdot 1060 = 25,4 \cdot 10^5 \text{ Па} = 2540 \text{ кПа}.$$

**Приклад 3.3** Визначити втрати тиску при пневмотранспортуванні мілкового вугілля із середнім діаметром частинок  $d = 5 \cdot 10^{-4}$  м, густиною  $\rho_T = 1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Масова концентрація завислих частинок  $C_p = 1$ . Пневмотранспортування здійснюється по сталевому трубопроводі діаметром  $D = 0,3$  м, довжиною  $l = 100$  м. Температура повітря  $t = 20$  °С.

Розв'язування

Швидкість транспортування мілкового вугілля повинна бути більше або дорівнювати критичній швидкості.

При густині  $\rho_{\text{пов}} = 1,16$  кг/м<sup>3</sup> знаходимо критичну швидкість

$$V_{\text{кр}} = 0,3 \sqrt{C_p \cdot a \cdot g \cdot D} = 0,3 \sqrt{1 \cdot \frac{1,8 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 9,8 \cdot 0,3} = 20 \text{ м/с},$$

де  $a = \rho_T / \rho_{\text{пов}}$ .

Втрати тиску в трубопроводах пневмотранспорту при швидкості  $V = V_{кр}$  розраховуємо за формулою

$$\Delta P_{дф} = \Delta P_{пов}(1 + \varphi C_p),$$

$$\text{де } \Delta P_{пов} = \lambda \frac{1}{D} \frac{\rho_{пов} V_{кр}^2}{2}.$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  визначаємо при  $k_e = 10^{-4}$  (табл. 3.1 [2]) і кінетиматичній в'язкості повітря  $\nu$  за формулою

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_e}{D} + \frac{68}{R_e} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{10^{-4}}{0,3} + \frac{68 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 0,3} \right)^{0,25} = 0,017.$$

$$\text{Тоді } \Delta P_{пов} = 0,017 \cdot \frac{100}{0,3} \cdot 1,16 \cdot \frac{20^2}{2} = 1,31 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Приймаючи  $\varphi = 0,6$  за табл. XXII.3 [14], знаходимо втрати тиску при транспортуванні мілкового вугілля

$$\Delta P_{дф} = 1,31 \cdot 10^3 (1 + 0,60 \cdot 1) = 2,1 \cdot 10^3 \text{ Па} = 2,1 \text{ кПа.}$$

**Приклад 3.4** Визначити максимальну товщину кристалічного шару льоду, що утворюється в умовах вільної конвенції на вертикальній сталевій пластині, яка має товщину  $\delta_{ст} = 2$  мм і висоту  $L = H = 100$  мм. Початкова температура води дорівнює  $t_b = 15$  °С. Охолодження відбувається киплячим фреоном, що має температуру кипіння  $t_s = -30$  °С і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1 = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

#### Розв'язування

Теплопровідність льоду та стінки відповідно  $\lambda_{л} = 2,2$  Вт/(м·К) і  $\lambda_{ст} = 50$  Вт/(м·К).

Термічний опір

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} = \frac{1}{1000} + \frac{0,002}{50} = 1,04 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Теплофізичні властивості води

при  $t_b = 15$  °С :  $\beta = 1,26 \cdot 10^{-4}$  1/К;  $\nu_b = 1,15 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $Pr_p = 8,26$ ,

при  $t_b = 0$  °С :  $Pr_{ст} = 13,67$ .

Критерій Грасгофа

$$Gr_p = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{л} - t_b) \cdot L^3}{\nu_b^2} = \frac{9,8 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot (0 - 15) \cdot 0,1^3}{(1,15 \cdot 10^{-6})^2} = 1,4 \cdot 10^7.$$

Комплекс  $Gr_p \cdot Pr_p$

$$Gr_p \cdot Pr_p = 1,4 \cdot 10^7 \cdot 8,26 = 1,16 \cdot 10^8.$$

Оскільки  $Gr_p \cdot Pr_p < 6 \cdot 10^{10}$ , вільна течія вздовж вертикальної поверхні льоду є ламінарною.

Критерій Нуссельта

$$Nu_{p,\ell} = 0,75 \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} = 0,75 \cdot (1,4 \cdot 10^7 \cdot 8,26)^{0,25} \cdot \left( \frac{8,26}{13,67} \right)^{0,25} = 68,6.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі від води до поверхні льоду в умовах вільної конвекції і ламінарної течії

$$\alpha = \frac{Nu_{p,\ell} \cdot \lambda_{\text{в}}}{L} = \frac{68,6 \cdot 0,586}{0,1} = 402 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Максимальна товщина льоду

$$\delta_{\max} = \left[ \frac{(t_{\text{л}} - t_{\text{с}})}{\alpha_2 \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{л}})} - R_2 \right] \cdot \lambda_{\text{л}} = \left[ \frac{(0 - (-30))}{1000 \cdot (15 - 0)} - 1,4 \cdot 10^{-3} \right] \cdot 2,2 = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

### 3.2 Задачі для самостійної роботи

**Приклад 3.5** Визначити швидкість зависання в повітрі  $w_{\text{зав}}$  частинки, яка має форму кулі, якщо діаметр частинки  $d$ , густина матеріалу  $\rho_{\text{ТВ}}$ , температура повітря  $t$ .

Остання цифра шифру	$d$ , мм	$\rho_{\text{ТВ}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Передостання цифра шифру	$t$ , °C
0	0,05	550	0	10
1	0,06	560	1	20
2	0,07	570	2	30
3	0,08	580	3	40
4	0,09	590	4	50
5	0,1	600	5	60
6	0,11	610	6	70
7	0,12	620	7	80
8	0,13	630	8	90
9	0,14	640	9	100

**Приклад 3.6** Гідросуміш транспортується по сталевому зварному трубопроводі довжиною  $L$  і діаметром  $D$ . Масова концентрація твердої фази  $C_p$ . Густина твердого матеріалу  $\rho_T$ . Середній розмір транспортованого матеріалу  $d$ . Визначити витрату гідросуміші  $Q_{df}$ , якщо транспортування здійснюється за критичної швидкості. Температура суміші дорівнює  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Остання цифра шифру	$L$ , м	$D$ , мм	$C_p$	Передостання цифра шифру	$\rho_T \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , мм
0	2100	600	0,07	0	2,59	0,8
1	2200	400	0,08	1	2,61	0,9
2	2300	500	0,09	2	2,62	1,0
3	2400	600	0,1	3	2,63	1,1
4	2500	700	1,11	4	2,64	1,2
5	2600	600	1,12	5	2,65	1,3
6	2700	700	1,13	6	2,66	1,4
7	1900	600	0,1	7	2,58	1,5
8	1800	400	0,09	8	2,57	1,6
9	1700	500	0,11	9	2,56	1,7

**Приклад 3.7** Визначити втрати тиску при пневмотранспортуванні мілкового вугілля із середнім діаметром частинок  $d$ , густиною  $\rho_T$ . Масова концентрація завислих частинок  $C_p$ . Пневмотранспортування здійснюється по сталевому трубопроводі діаметром  $D$ , довжиною  $L$ . Температура повітря  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Остання цифра шифру	$d$ , мм	$\rho_T \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$	Передостання цифра шифру	$D$ , м	$L$ , м
0	0,3	1,6	0,6	0	0,3	100
1	0,4	1,65	0,7	1	0,4	150
2	0,5	1,7	0,8	2	0,5	200
3	0,6	1,75	0,9	3	0,6	220
4	0,7	1,8	1	4	0,7	240
5	0,8	1,85	1,1	5	0,8	260
6	0,9	1,90	1,2	6	1,0	450
7	1,0	1,62	1,3	7	0,4	350
8	0,6	1,72	1,4	8	0,5	420
9	0,5	1,82	1,5	9	0,6	380

**Приклад 3.8** Визначити максимальну товщину кристалічного шару льоду, що утворюється в умовах вільної конвенції на вертикальній пластині, яка має товщину  $2,5\text{ мм}$  і висоту  $150\text{ мм}$ . Початкова температура води дорівнює  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Охолодження відбувається киплячим фреоном, що має температуру кипіння  $t_s = -40\text{ }^\circ\text{C}$  і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{kin} = 1200\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Приклад 3.9** Визначити товщину шару льоду через 20 хвилин після початку процесу кристалізації, що відбувається при  $t_{\text{води}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Охолодження відбувається на вертикальній сталевій пластині, яка має товщину 2 мм, киплячим фреоном, що має температуру кипіння  $t_s = -20 \text{ }^\circ\text{C}$  і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{кин}} = 900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Приклад 3.10** Визначити товщину шару льоду через 30 хвилин після початку процесу кристалізації, що відбувається при  $t_{\text{води}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Охолодження відбувається на вертикальній мідній пластині, яка має товщину 3 мм, киплячим фреоном, що має температуру кипіння  $t_s = -25 \text{ }^\circ\text{C}$  і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{кин}} = 950 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Приклад 3.11** Визначити інтенсивність плавлення льодової пластини довжиною 0,3 м, яка лежить на похилій поверхні під кутом  $\varphi = 30^\circ$  до горизонту і знаходиться у воді при температурі  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Прийняти  $\text{const} = 1$ .

**Приклад 3.12** Визначити інтенсивність плавлення льодової пластини довжиною 0,4 м, яка лежить на похилій поверхні під кутом  $\varphi = 30^\circ$  до горизонту і знаходиться у воді при температурі  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Прийняти коефіцієнт тепловіддачі в газі  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Приклад 3.13** Знайти довжину льодової пластини, яка лежить на похилій поверхні під кутом  $\varphi = 30^\circ$  до горизонту, на якій завершується процес плавлення в парі з ламінарним перебігом рідкої плівки. Температура пари  $t_s = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Приклад 3.14** Визначити інтенсивність плавлення горизонтальної льодової платини товщиною 20 мм в паровому середовищі. Температура пари  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Максимальний час плавлення горизонтальної пластини льоду в газовому середовищі. Початкова товщина пластини 20 мм. Температура газу  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Приклад 2.15** Визначити інтенсивність плавлення льодової пластини товщиною 20 мм в паровому середовищі. Температура пари  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Час процесу складає 10 хвилин.

**Приклад 2.16** Визначити час завершення процесу плавлення маси льоду в рідині. Відомо, що маса  $M_1 = 0,5 \text{ кг}$ , маса рідини  $M_2 = 0,15 \text{ кг}$ . Початкова температура рідини  $t_{00} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура плавлення  $t_{\text{пл}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , коефіцієнт тепловіддачі при плавленні  $\alpha_{\text{пл}} = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .



## Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте ступінь проточності грубодисперсних систем, основні класи. Наведіть області застосування.
2. Проаналізуйте структури потоку при пневмотранспортуванні.
3. Які особливості структури потоку при гідротранспортуванні?
4. Поясніть транспортування частинки, швидкість зависання і її визначення.
5. Наведіть основи розрахунків дисперсних середовищ.
6. Поясніть основні характеристики дисперсних потоків: концентрацію, геометричну і гідравлічну хрупкість, критичну швидкість.
7. Обґрунтуйте метод визначення втрат тиску дисперсних потоків.
8. Поясніть гідравлічний розрахунок трубопроводів гідротранспортування.
9. Поясніть гідравлічний розрахунок трубопроводів пневмотранспортування.
10. Поясніть поняття: фільтрація, фільтраційна витрата, швидкість фільтрації, пористість, закон Дарсі.
11. Поясніть фазові переходи в системі «рідина – тверде тіло».

## 4 ДВОФАЗНІ ТЕЧІЇ

### 4.1 Приклади розв'язання задач

**Приклад 4.1** У вертикальній трубі знизу вверх рухається двофазний потік. Загальний перепад тиску між двома перерізами  $\Delta P$ .

Визначити:

1.  $\Delta P_{тр}$  ?, дано  $\Delta P_{в} = 78$  кПа,  $\Delta P_{пр} = 11$  кПа.
2.  $\Delta P_{в}$  ?, дано  $\Delta P_{тр} = 21$  кПа,  $\Delta P_{пр} = 8$  кПа.
3.  $\Delta P_{пр}$  ?, дано  $\Delta P_{в} = 63$  кПа,  $\Delta P_{тр} = 23$  кПа.

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\Delta P$ , кПа	100	102	104	105	107	109	111	108	106	103

### Розв'язування

Розв'язування наведено для варіанта останньої цифри «0».

1. Загальні втрати тиску у вертикальному трубопроводі

$$\Delta P = \Delta P_{в} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{пр}.$$

2. Втрати тиску на тертя

$$\Delta P_{тр} = \Delta P - \Delta P_{в} - \Delta P_{пр} = 103 - 78 - 11 = 14 \text{ кПа.}$$

3. Вагова втрата тиску

$$\Delta P_{в} = \Delta P - \Delta P_{тр} - \Delta P_{пр} = 103 - 21 - 8 = 74 \text{ кПа.}$$

4. Втрати тиску на прискорення

$$\Delta P_{пр} = \Delta P - \Delta P_{тр} - \Delta P_{в} = 103 - 23 - 63 = 17 \text{ кПа.}$$

**Приклад 4.2** Повітряний потік рухається в круглій трубі знизу вверх. Дано  $w_{см}$ ,  $w''_0$ . Дійсний об'ємний газовміст для даного випадку визначається за допомогою залежності  $\varphi = c \cdot \beta$ , де  $c = 0,91$ .

Визначити: осереднену відносну швидкість фаз  $w_r$ ; дійсну середню швидкість повітря  $w''$ , коефіцієнт ковзання фаз  $S = w''/w'$ .

Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$w''_0$ , м/с	2,4	3,1	2,9	3,7	4,1	4,7	4,9	3,1	3,9	5,1
$w_{см}$ , м/с	3,0	3,5	3,9	4,3	4,8	5,4	5,9	6,3	6,7	7,0

## Розв'язування

Розв'язування наведено для варіанта останньої цифри «0»

1. Приведена швидкість води

$$w_{\text{см}} = w'_0 + w''_0; \rightarrow w'_0 = w_{\text{см}} - w''_0 = 7,0 - 5,1 = 1,9 \text{ м/с.}$$

2. Витратний об'ємний газовміст

$$\beta = w''_0 / w_{\text{см}} = 5,1 / 7 = 0,729 .$$

3. Дійсний об'ємний газовміст

$$\varphi = c \cdot \beta = 0,91 \cdot 0,729 = 0,663 .$$

4. Середня дійсна швидкість повітря

$$w'' = w''_0 / \varphi = 5,1 / 0,663 = 7,69 \text{ м/с.}$$

5. Середня дійсна швидкість води

$$w' = w'_0 / (1 - \varphi) = 1,9 / (1 - 0,663) = 5,64 \text{ м/с.}$$

6. Осереднена відносна швидкість фаз

$$w_r = w'' - w' = 7,69 - 5,64 = 2,05 \text{ м/с.}$$

7. Коефіцієнт ковзання фаз

$$S = w'' / w' = 7,69 / 5,64 = 1,363 .$$

**Приклад 4.3** Пароводяний потік рухається знизу вгору по вертикальній трубі діаметром  $D$ . Середній абсолютний тиск на виділеній ділянці труби  $P$ , масовий витратний паровміст  $x$ , швидкість циркуляції  $w_0$ .

Визначити дійсний об'ємний паровміст  $\varphi$ , середню відносну швидкість пари і води  $w_r$ .

Передостання цифра шифру	$w_0$ , м/с	$x$	Остання цифра шифру	$P$ , бар	$D$ , мм
0	1,2	0,005	0	1,9	40
1	0,7	0,0048	1	1,0	40
2	0,8	0,0062	2	1,1	45
3	0,75	0,0051	3	1,2	50
4	0,85	0,005	4	1,3	55
5	0,9	0,0045	5	1,4	30
6	0,95	0,004	6	1,5	35
7	1,0	0,0065	7	1,6	40
8	1,05	0,006	8	1,7	45
9	1,1	0,004	9	1,8	50

## Розв'язування

1. За абсолютним тиском  $P = 1,9$  бар з таблиць теплофізичних властивостей знаходимо густину води і пари (відповідно) в стані насичення

$$\rho' = 943,93 \text{ кг/м}^3, \rho'' = 1,076 \text{ кг/м}^3.$$

2. Середня приведена швидкість пари

$$x = \frac{w_0'' \cdot \rho''}{w_0 \cdot \rho'} \rightarrow w_0'' = x \cdot w_0 \cdot \rho' / \rho'' = 0,005 \cdot 1,2 \cdot 943,93 / 1,076 = 5,26 \text{ м/с.}$$

3. Середня приведена швидкість води, м/с

$$x = \frac{w_0'' \cdot \rho''}{w_0 \cdot \rho'} \rightarrow w_0'' \cdot \rho'' = x \cdot w_0 \cdot \rho';$$

$$w_0 = w_0' + \frac{w_0'' \cdot \rho''}{\rho'} \rightarrow w_0' = w_0 - \frac{w_0'' \cdot \rho''}{\rho'} = w_0 - \frac{x \cdot w_0 \cdot \rho'}{\rho'} = w_0 \cdot (1 - x);$$

$$w_0' = w_0 \cdot (1 - x) = 1,2 \cdot (1 - 0,005) = 1,194 \text{ м/с.}$$

4. Витратний об'ємний паровміст

$$\beta = w_0'' / (w_0' + w_0'') = 5,26 / (5,26 + 1,194) = 0,815.$$

5. Оскільки  $\beta \leq 0,9$ , то дійсний об'ємний паровміст

$$\varphi = c \cdot \beta = 0,91 \cdot 0,815 = 0,742.$$

6. Осереднена відносна швидкість фаз

$$w_r = \frac{w_0''}{\varphi} - \frac{w_0'}{1 - \varphi} = \frac{5,26}{0,742} - \frac{1,194}{1 - 0,742} = 7,09 - 4,63 = 2,46 \text{ м/с.}$$

**Приклад 4.4** Визначити вагову складову градієнта тиску  $\Delta P_v$  (нівелірний перепад), рушійний напір  $\Delta P_{руш}$  пароводяного потоку на вертикальній ділянці труби парогенератора довжиною  $L$ . Недогрів води в опускних трубах  $\Delta t_{нед}$ , середній тиск на ділянці  $P$ , середній об'ємний паровміст  $\bar{\varphi}$ .

Передостання цифра шифру	P, бар	$\bar{\varphi}$	Остання цифра шифру	L, м	$\Delta t_{нед}$ , °C
0	90	0,8	0	2,9	4
1	20	0,7	1	3,0	1
2	25	0,65	2	3,1	2
3	30	0,68	3	3,2	3
4	35	0,72	4	3,3	4
5	40	0,59	5	3,4	5
6	50	0,62	6	3,5	6
7	60	0,77	7	3,6	1
8	70	0,73	8	2,7	2
9	80	0,75	9	2,8	3

## Розв'язування

1. За середнім абсолютним тиском  $P = 90$  бар з таблиць теплофізичних властивостей знаходимо густину води і пари (відповідно) в стані насичення

$$\rho' = 705,27 \text{ кг/м}^3, \rho'' = 48,88 \text{ кг/м}^3.$$

2. Середня дійсна густина пароводяного потоку на ділянці

$$\bar{\rho} = \bar{\varphi} \cdot \rho'' + (1 - \bar{\varphi}) \cdot \rho' = 0,8 \cdot 48,88 + (1 - 0,8) \cdot 705,27 = 180,16 \text{ кг/м}^3.$$

3. Вагова складова градієнта тиску

$$\Delta P_v = \Delta P_{\text{нів}} = L \cdot \bar{\rho} \cdot g = 2,9 \cdot 180,16 \cdot 9,8 = 5120,15 \text{ Па}.$$

4. Густина води у опускних трубах визначається за температурою води  $t_{\text{оп}} = t' - \Delta t_{\text{нед}} = 303,31 - 4 = 299,31$  °С і дорівнює  $\rho_{\text{оп}} = 713,67$  кг/м<sup>3</sup>, де  $t' = f(P)$ .

5. Рушійний напір

якщо  $\Delta t_{\text{нед}} \leq 3$  °С  $P_{\text{руш}} = L \cdot \bar{\varphi} \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g$ , Па.

якщо  $\Delta t_{\text{нед}} > 3$  °С  $P_{\text{руш}} = L \cdot (\bar{\varphi} \cdot (\rho' - \rho'') + (\rho_{\text{оп}} - \rho')) \cdot g$ , Па.

Оскільки  $\Delta t_{\text{нед}} > 3$  °С, то

$$\begin{aligned} P_{\text{руш}} &= 2,9 \cdot [0,8 \cdot (705,27 - 48,88) + (713,67 - 705,27)] \cdot 9,8 = \\ &= 2,9 \cdot (525,112 + 8,4) \cdot 9,8 = 15162,41 \text{ Па}. \end{aligned}$$

### 4.2 Задачі для самостійної роботи

**Приклад 4.5** Питомий тепловий потік, який іде на випаровування на поверхні поділу фаз дорівнює  $q_a$ . Абсолютний тиск, під яким відбувається випаровування –  $P$ . Визначити силу, нормальну до поверхні поділу фаз.

Остання цифра шифру	$q_a$ , Вт/м <sup>2</sup>	Передостання цифра шифру	$P$ , Па
0	100 000	0	$1 \cdot 10^5$
1	200 000	1	$2 \cdot 10^5$
2	300 000	2	$3 \cdot 10^5$
3	50 000	3	$4 \cdot 10^5$
4	25 000	4	$0,5 \cdot 10^5$
5	10 000	5	$0,3 \cdot 10^5$
6	150 000	6	$5 \cdot 10^5$
7	250 000	7	$6 \cdot 10^5$
8	400 000	8	$7 \cdot 10^5$
9	500 000	9	$1,5 \cdot 10^5$

**Приклад 4.6** Парова бульбашка сферичної форми має об'єм  $V$ . Кипляча пароводяна суміш знаходиться під тиском  $P$ . Наскільки тиск в паровій бульбашці перевищує тиск навколишнього середовища? Яка маса та вага цієї бульбашки?

Остання цифра шифру	$V, \text{см}^3$	Передостання цифра шифру	$P, \text{кПа}$
0	0,01	0	100
1	0,009	1	110
2	0,008	2	120
3	0,007	3	130
4	0,006	4	140
5	0,005	5	150
6	0,011	6	160
7	0,012	7	170
8	0,0095	8	180
9	0,0085	9	190

**Приклад 4.7** Двофазний повітряноводяний потік рухається у вертикальній трубі, процес ізотермічний. В нижньому (верхньому) перерізі приведена швидкість рідини та газу дорівнює відповідно  $w'_0, w''_0$ .

Дано: довжина каналу  $L$ , діаметр каналу  $D$ , абсолютний тиск в нижньому (верхньому) перерізі  $P_1$  ( $P_2$ ), температура суміші  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Визначити витратні та дійсні характеристики:  $M', M'', \text{кг/с}; w'_0, w''_0, w', w'', w_{\Gamma}, \text{м/с}; \beta, \varphi, K = w''/w', \rho_{\text{см}}, \rho_{\text{см}}^{\text{д}}$ , втрати на тертя, на прискорення, нівелірну (вагову) складову, загальний перепад тиску, тиск на початку (кінці) каналу.

Остання цифра шифру	$(w'_0)_1, \text{м/с}$	$(w''_0)_1, \text{м/с}$	$(w'_0)_2, \text{м/с}$	$(w''_0)_2, \text{м/с}$	Передостання цифра шифру	$P_1 \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$P_2 \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$D, \text{мм}$	$L, \text{м}$
0	0,9	4,0			0	1,95		37	5
1	0,65	3,9			1		1,35	30	4,5
2	0,8	3,8			2	1,8		20	4,0
3	0,75	3,7			3		2,5	30	5,2
4	0,7	3,3			4	2,1		20	5,4
5			0,6	3,5	5		1,7	37	4,6
6			0,5	3,7	6	2,2		30	4,4
7			0,55	3,9	7		1,6	20	4,3
8			0,65	4,1	8	2,3		37	4,2
9			0,70	4,5	9		1,5	30	4,1

**Приклад 4.8** Двофазний повітряноводяний потік рухається в горизонтальній трубі, процес ізотермічний.

Дано:  $L, D, P_1$  ( $P_2$ ),  $M', M''$ . Температура суміші  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Визначити витратні та дійсні характеристики в першому (другому) перерізі, середні по довжині:  $w'_0, w''_0, \beta, w', w'', w_{\Gamma}, \varphi, \rho_{\text{см}}, \rho_{\text{см}}^{\text{д}}$ , втрати на тертя, на прискорення, тиск на початку (кінці) каналу. Визначити форму потоку.

Остання цифра шифру	$M'$ , кг/с	$M''$ , кг/с	$D$ , мм	Передостання цифра шифру	$P_1 \cdot 10^{-5}$ , Па	$P_2 \cdot 10^{-5}$ , Па	$L$ , м
0	0,5	0,03	30	0	1,35		5
1	0,25	0,02	20	1		1,95	5,5
2	0,8	0,035	37	2	1,3		3,0
3	0,2	0,023	20	3		2,1	6,5
4	0,3	0,025	30	4	1,4		7,0
5	0,7	0,03	37	5		2,2	7,5
6	0,18	0,025	20	6	1,2		8,0
7	0,55	0,035	30	7		2,0	8,5
8	0,3	0,08	37	8	1,15		9,0
9	0,15	0,03	20	9		1,85	9,5

**Приклад 4.9** В трубi рухається  $H_2O$ . В певному перерізі надлишковий тиск  $P_{\text{надл.}}$ , температура  $t$ . Барометричний тиск  $P_{\text{бар}}$ . Визначити стан речовини в перерізі.

Остання цифра шифру	$t$ , °C	$P_{\text{бар}}$ , мм рт. ст.	Передостання цифра шифру	$P_{\text{надл.}}$
0	120	735	0	26 кПа
1	130	738	1	3 бар
2	140	740	2	2,1 ат
3	150	745	3	$6 \cdot 10^5$ Па
4	160	750	4	120 кПа
5	168	755	5	1,8 бар
6	175	760	6	2,4 ат
7	135	740	7	2,8 бар
8	155	748	8	$4 \cdot 10^5$ Па
9	162	752	9	19 кПа

**Приклад 4.10** У вертикальний трубопровiд діаметром  $D$  надходить вода зі швидкістю  $w_0$ , м/с. В перерізі 1–1 абсолютний тиск води складає  $P_1$ , ентальпія  $h_1$ . В перерізі 2–2 абсолютний тиск складає  $P_2$ ,  $h_2 = h_1$ ,  $Q = 0$ .

Визначити характеристики двофазного потоку в перерізі 2–2: масову витрату парової фази, масову витрату рідкої фази, масову витрату парорідинної суміші, масовий паровміст, приведені швидкості парової та рідкої фаз, швидкість суміші та об'ємний витратний паровміст.

Остання цифра шифру	$h_1$ , кДж/кг	$P_1$ , МПа	$P_2$ , бар	Передостання цифра шифру	$w_0$ , м/с	$D$ , мм
0	500	0,2	1,1	0	3	125
1	505	0,21	1,2	1	4	100
2	510	0,22	1,3	2	5	150
3	515	0,23	1,4	3	6	200
4	520	0,24	1,5	4	7	250
5	525	0,25	1,6	5	3	100
6	530	0,26	1,7	6	4	150
7	535	0,27	1,8	7	5	200
8	508	0,22	1,2	8	6	250
9	518	0,24	1,3	9	7	125

**Приклад 4.11** У вертикальний трубопровід діаметром  $D$  надходить вода зі швидкістю  $w_0$ , м/с. В перерізі 1–1 абсолютний тиск води складає  $P_1$ , ентальпія  $h_1$ . В перерізі 2–2 абсолютний тиск складає  $P_2$ . На ділянці між перерізами 1–1 та 2–2 підводиться або відводиться теплота  $Q$ . Ентальпія  $h_2 \neq h_1$ .

Визначити характеристики двофазного потоку в перерізі 2–2: масову витрату парової фази, масову витрату рідкої фази, масову витрату парорідинної суміші, масовий паровміст, приведені швидкості парової та рідкої фаз, швидкість суміші та об'ємний витратний паровміст.

Остання цифра шифру	$h_1$ , кДж/кг	$P_1$ , МПа	$P_2$ , бар	$Q$ , кВт	Передостання цифра шифру	$w_0$ , м/с	$D$ , мм
0	518	0,24	1,4	+200	0	3,5	100
1	508	0,22	1,3	-300	1	3,4	125
2	535	0,27	1,8	+400	2	3,3	150
3	530	0,26	1,7	-200	3	3,2	125
4	525	0,25	1,6	+300	4	3,1	100
5	520	0,24	1,5	-400	5	3,0	130
6	515	0,23	1,4	-250	6	3,5	119
7	510	0,22	1,3	+350	7	3,4	150
8	505	0,21	1,2	-450	8	3,3	100
9	500	0,20	1,1	+450	9	3,2	125

**Приклад 4.12** В певному перерізі труби надлишковий тиск  $P$ , масовий витратний паровміст  $x$ . Діаметр труби  $D$ , мм; масова витрата пароводяної суміші  $M$ , кг/с. Барометричний тиск  $P_{\text{бар}} = 745$  мм рт. ст. Визначити витратні характеристики потоку:  $w'_0$ ,  $w''_0$ ,  $w_{\text{см}}$ ,  $\beta$ ,  $\rho_{\text{см}}$  та безрозмірні параметри  $Re'$ ,  $Re''$ ,  $Fr'$ ,  $Fr''$ ,  $Fr_{\text{см}}$ ,  $We$ .

Передостання цифра шифру	$P$ , атм	$x$	Остання цифра шифру	$D$ , мм	$M$ , кг/с
0	1,0	0,04	0	20	0,5
1	1,1	0,05	1	30	1,0
2	1,2	0,06	2	0	1,7
3	1,3	0,07	3	50	3,6
4	1,4	0,08	4	60	4,4
5	1,15	0,09	5	70	6,5
6	1,25	0,10	6	80	7,5
7	1,35	0,055	7	30	1,2
8	1,45	0,065	8	40	1,4
9	1,50	0,075	9	50	3,3

**Приклад 4.13** В круглому трубопроводі внутрішнім діаметром  $D$  рухається пароводяна суміш. В заданому перерізі надлишковий тиск  $P_m$ , приведена швидкість пари  $w''_0$ , масовий паровміст в заданому перерізі  $x$ . Визначити масову витрату суміші в заданому перерізі.

В заданий переріз додатково подається вода з витратою 17 % від витрати пароводяної суміші, недогрів води до температури насичення  $\Delta t_{\text{нед}} = 3,4$  °С.



Визначити: приведену швидкість води  $w'_0$ , швидкість циркуляції води  $w_0$ , витратний об'ємний паровміст  $\beta$ , масову витрату суміші  $M$ , масову витрату води, пари відповідно  $M'$ ,  $M''$ . Визначити ці параметри до подачі не-догрітої води і після.

Остання цифра шифру	D, мм	$P_m$ , атм	Передостання цифра шифру	$w''_0$ , м/с	x
0	20	0,5	0	4,0	0,14
1	15	0,7	1	4,6	0,13
2	25	0,9	2	4,9	0,12
3	30	1,1	3	5,2	0,11
4	35	1,3	4	5,4	0,10
5	40	1,5	5	6,0	0,09
6	45	1,7	6	7,0	0,08
7	60	2,0	7	6,5	0,07
8	70	2,5	8	3,8	0,15
9	65	2,3	9	4,1	0,17

**Приклад 4.14** Пароводяна суміш рухається в круглому трубопроводі зовнішнім діаметром  $D$  і товщиною стінки  $\delta$ . В заданому перерізі надлишковий тиск  $P$ , приведена швидкість води  $w'_0$ , витратний масовий паровміст  $x$ . Барометричний тиск  $P_{\text{бар}} = 745$  мм рт. ст. Визначити витратний об'ємний паровміст  $\beta$ .

Остання цифра шифру	D, мм	$\delta$ , мм	Передостання цифра шифру	$P_1 \cdot 10^{-3}$ , Па	$w'_0$ , м/с	x
0	30	1,5	0	30	0,8	0,15
1	38	2,5	1	40	0,76	0,18
2	57	3,5	2	50	0,81	0,20
3	76	3,0	3	60	0,72	0,26
4	17	1,5	4	70	0,66	0,31
5	22	2,0	5	80	0,57	0,34
6	25	2,0	6	90	0,49	0,36
7	32	1,5	7	100	0,75	0,33
8	51	2,5	8	120	0,64	0,29
9	42	2,5	9	140	0,53	0,07

**Приклад 4.15** В заданий переріз, надлишковий тиск в якому  $P_m$ , приведена швидкість пари  $w''_0$ , масовий паровміст  $x$ , до пароводяної суміші подається недогріта до температури насичення вода з витратою 17 % від масової витрати пароводяної суміші, недогрів води до температури насичення  $\Delta t_{\text{нед}} = 1,6$  °С. Визначити параметри пароводяної суміші в заданому перерізі до подачі води  $w'_0$ ,  $t$  та після –  $w''_0$ ,  $x$ .

Остання цифра шифру	D, мм	P <sub>м</sub> , атм	Передостання цифра шифру	w <sub>0</sub> '', м/с	x
0	20	0,5	0	4,0	0,14
1	15	0,7	1	4,6	0,13
2	25	0,9	2	4,9	0,12
3	30	1,1	3	5,2	0,11
4	35	1,3	4	5,4	0,10
5	40	1,5	5	6,0	0,09
6	45	1,7	6	7,0	0,08
7	60	2,0	7	6,5	0,07
8	70	2,5	8	3,8	0,15
9	65	2,3	9	4,1	0,17

**Приклад 4.16** У сталевий вертикальний трубопровід діаметром D та довжиною L надходить вода зі швидкістю w<sub>0</sub>, м/с. Тиск в перерізі 1–1 складає P<sub>1</sub>, ентальпія h<sub>1</sub>. На ділянці між перерізами 1–1 та 2–2 підводиться питомих тепловий потік q.

Визначити відстань від перерізу 1–1 до перерізу закипання води у трубі l<sub>пз</sub>, тиск у перерізі закипання P<sub>пз</sub>, температуру у перерізі закипання t<sub>пз</sub>, а також довжину ділянки двофазного потоку l<sub>дф</sub>.

Остання цифра шифру	h <sub>1</sub> , кДж/кг	P <sub>1</sub> , бар	q, кВт/(м <sup>2</sup> )	Передостання цифра шифру	L, м	w <sub>0</sub> , м/с	D, мм
0	553	3,0	50	0	8	0,7	50
1	538	2,7	45	1	7	0,6	45
2	527	2,5	30	2	6	0,5	40
3	515	2,3	35	3	5	0,4	35
4	496	2,0	20	4	4	0,3	30
5	474	1,7	10	5	3	0,2	20
6	458	1,5	50	6	8	0,5	45
7	543	2,8	40	7	7	0,4	40
8	532	2,6	20	8	6	0,3	35
9	509	2,2	10	9	5	0,2	20

**Приклад 4.17.** За умовами прикладу 4.16 визначити тиск P<sub>2</sub> у перерізі 2–2.

## Контрольні запитання

1. Наведіть приклади двофазних течій в теплоенергетичному та тепло-технологічному обладнанні.
2. Дайте пояснення методу подібності.
3. Наведіть основні безрозмірні параметри потоку газорідинної суміші.
4. Обґрунтуйте визначальні і визначувані критерії.
5. Поясніть усереднені дійсні і витратні параметри газорідинної суміші.
6. Поясніть поняття: приведена швидкість рідини і газу, витратна швидкість суміші, швидкість циркуляції.
7. В чому відмінність понять: об'ємний витратний і дійсний газовміст потоку?
8. В чому відмінність понять: середня витратна і дійсна густина суміші?
9. Поясніть, що таке дійсні середні швидкості течії фаз, середня відносна швидкість фаз.
10. Проаналізуйте режими течії вертикальних двофазних потоків.
11. Проаналізуйте режими течії горизонтальних двофазних потоків.
12. Поясніть механічну взаємодію на границі поділу фаз.
13. Обґрунтуйте силу, нормальну до поверхні поділу фаз.
14. Дайте оцінку тепловій взаємодії на поверхні поділу фаз.
15. Дайте оцінку величині стрибка тиску на межі фаз.
16. Проаналізуйте рух одиноких крапель і бульбашок.
17. Поясніть рівняння суцільності двофазної течії.
18. Обґрунтуйте складові рівняння імпульсу двофазної течії.
19. Обґрунтуйте складові рівняння енергії двофазної течії.
20. Дайте означення гомогенної течії. Рівняння гомогенної течії, його складові.
21. Обґрунтуйте зв'язок рівняння імпульсу і енергії.
22. Двофазні критичні течії. Яка умова характеризує критичну течію.
23. Поясніть дійсний газовміст, методи визначення і розрахунки.
24. Обґрунтуйте методи розрахунку опору за довжиною каналу газорідинного потоку.
25. Поясніть взаємозв'язок руху і фазових переходів в парорідинних течіях.
26. Дайте оцінку впливу нерівноважності потоку на його рух. Місцеві опори двофазним течіям, методи розрахунку.
27. Поясніть втрати на прискорення в двофазних потоках.
28. Обґрунтуйте математичну модель гідродинамічних процесів контуру з природною циркуляцією.
29. Проаналізуйте тепловіддачу до двофазних потоків в круглих трубах.
30. Проаналізуйте тепловіддачу до двофазних потоків в кільцевих каналах.
31. Поясніть механізм кризи теплообміну між стінкою круглої труби і двофазним потоком.
32. Поясніть методику розрахунку тепловіддачі до двофазних потоків.
33. Обґрунтуйте структуру математичної моделі теплогідродинамічних процесів в контурі з природною циркуляцією.

## 5 ТЕПЛО- І МАСООБМІН В ДВОКОМПОНЕНТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

### 5.1 Приклади розв'язання задач

**Приклад 5.1** Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі та тепловий потік від практично нерухомої ( $\omega_{\text{п}} = 0$ ) насиченої пари, яка конденсується на поверхні шахового пучка горизонтальних труб діаметром  $d_3 \times \delta = 25 \times 2$  мм при абсолютному тиску  $P_{\text{н}} = 101,3 + 79,5 = 180,8$  кПа в присутності  $\bar{y}_{\text{пов}} = 2\%$  (мас.) повітря, якщо кількість труб у вертикальному ряді  $m = 6$ , загальна кількість труб  $n = 18$ , довжина труб  $\ell = 0,56$  м, середня температура стінки труби  $t_{\text{F}} = 105$  °С.

Розв'язування

Температура конденсації (насичення) водяної пари при  $P_{\text{н}} = 1,808 \cdot 10^5$  Па

$$t_{\text{конд}} = t_{\text{н}} = 116,8 \text{ °С}$$

Питома теплота конденсації при  $t_{\text{н}} = 116,8$  °С

$$r = 2216 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$$

Середня температура плівки конденсату

$$t_{\text{пл}} = \frac{t_{\text{н}} + \bar{t}_{\text{F}}}{2} = \frac{116,8 + 105}{2} = 110,9 \text{ °С.}$$

Теплофізичні властивості конденсату (води) при  $\bar{t}_{\text{пл}} = 110,9$  °С:

- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,6851$  Вт/(м·К);
- густина  $\rho = 950,3$  кг/м<sup>3</sup>;
- коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu = 253,8 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

Різниця температур

$$\Delta t_{\text{F}} = t_{\text{н}} - \bar{t}_{\text{F}} = 116,8 - 105,0 = 11,8 \text{ °С} = 11,8 \text{ К.}$$

Коефіцієнт, який залежить від кількості труб у вертикальному ряді та схеми розташування труб в пучку

$$\varepsilon_m = 1,21 \cdot m^{-0,25} = 1,21 \cdot 6^{-0,25} = 0,773.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі під час конденсації чистої водяної пари на пучку горизонтальних труб

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 1,28 \cdot \varepsilon_m \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r}{d_3 \cdot \mu \cdot \Delta t_{\text{F}}}} = 1,28 \cdot 0,773 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,6851^3 \cdot 950,3^2 \cdot 2216 \cdot 10^3}{0,025 \cdot 253,8 \cdot 10^{-6} \cdot 11,8}} = \\ &= 12325 \cdot 0,773 = 9527 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт, який враховує присутність повітря під час конденсації водяної пари, визначаємо за рис. 3.3 [1] залежно від  $\bar{y}_{\text{пов}} = 2\%$  при  $\omega_n = 0$ :

$$\varepsilon_{\text{сум}} = 0,3.$$

Тоді середній коефіцієнт тепловіддачі під час конденсації водяної пари в присутності повітря на пучку горизонтальних труб становить

$$\bar{\alpha}_{\text{сум}} = \varepsilon_{\text{сум}} \cdot \bar{\alpha} = 0,3 \cdot 9527 = 2858 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тепловий потік під час конденсації водяної пари в присутності повітря становить

$$\begin{aligned} Q &= \bar{\alpha}_{\text{сум}} \cdot F \cdot (t_n - \bar{t}_F) = \bar{\alpha}_{\text{сум}} \cdot n \cdot \pi \cdot d_3 \cdot \ell \cdot \Delta t_F = \\ &= 2858 \cdot 18 \cdot 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,56 \cdot 11,8 = 26685 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

**Приклад 5.2** Визначити середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі та тепловий потік між вільною плоскою поверхнею води і повітрям під час природної конвекції. Температура поверхні води  $t_F = 45^\circ\text{C}$ , навколишнього повітря –  $t_{\text{пов}} = 20^\circ\text{C}$ . Ширина поверхні води  $b = 0,4$  м, довжина  $\ell = 2,0$  м.

Розв'язування

Середня температура повітря в межовому шарі

$$\bar{t} = \frac{t_F + \bar{t}_{\text{пов}}}{2} = \frac{45 + 20}{2} = 32,5^\circ\text{C}.$$

Теплофізичні властивості повітря (додаток В):

- коефіцієнт теплопровідності при  $\bar{t} = 32,5^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 0,0269 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- коефіцієнт кінематичної в'язкості при  $\bar{t} = 32,5^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
- критерій Прандтля при  $\bar{t} = 32,5^\circ\text{C}$ ,  $Pr = 0,712$ ;
- густина при  $\bar{t}_F = 45^\circ\text{C}$ ,  $\rho_F = 1,11 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- густина при  $\bar{t}_{\text{пов}} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{\text{пов}} = 1,20 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Критерій Архімеда визначаємо за формулою

$$Ar = \frac{g b^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\text{пов}} - \rho_F}{\rho_{\text{пов}}} = \frac{9,81 \cdot 0,4^3}{(16,6 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1,20 - 1,11}{1,20} = 1,7 \cdot 10^8.$$

Визначаємо добуток

$$3 \cdot 10^6 < Ar \cdot Pr = 1,7 \cdot 10^8 \cdot 0,72 = 1,21 \cdot 10^8 < 2 \cdot 10^8.$$

Тоді критерій Нуссельта розраховуємо за формулою (3.27) [1]

$$\overline{Nu} = 5 \cdot (Ar \cdot Pr)^{0,104} = 5 \cdot (1,21 \cdot 10^8)^{0,104} = 34,6.$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі від вільної поверхні води до повітря під час природної конвекції становить

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{b} = \frac{34,6 \cdot 0,0269}{0,4} = 2,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Остаточний конвективний тепловий потік за законом Ньютона-Ріхмана становить

$$Q_k = \bar{\alpha}_k \cdot F \cdot (t_F - t_{\text{пов}}) = \bar{\alpha}_k \cdot b \cdot \ell \cdot (t_F - t_{\text{пов}}) = 2,33 \cdot 0,44 \cdot 2,0 \cdot (45 - 20) = 46,6 \text{ Вт}.$$

**Приклад 5.3** Визначити потік вологи, яка надходить в повітря приміщення природною конвекцією з вільної поверхні води у ванні. Площа ванни  $F = b \times \ell = 0,4 \times 2,0 = 0,8 \text{ м}^2$ . Температура поверхні води  $t_F = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура навколишнього повітря  $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , відносна вологість  $\varphi_{\text{пов}} = 60\%$ . Підрахувати також кількість теплоти з випаруваною вологою.

Розв'язування.

Визначаємо парціальний тиск насиченої пари у повітрі:

- при  $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{пов}}^H = 2340 \text{ Па}$ ;

- при  $t_F = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_F^H = 9580 \text{ Па}$ .

За формулою для визначення відносної вологості повітря ( $\varphi = P \cdot 100 / P^H, \%$ ) отримаємо парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі і в насиченому водяною парою повітрі ( $\varphi_F = 100 \%$ ) над поверхнею води у ванні

$$P_{\text{пов}} = \frac{\varphi_{\text{пов}} \cdot P_{\text{пов}}^H}{100} = \frac{60 \cdot 2340}{100} = 1404 \text{ Па};$$

$$P_F = P_F^H = 9580 \text{ Па}.$$

Визначаємо концентрацію водяної пари в навколишньому повітрі і над поверхнею води у ванні

$$C_{\text{пов}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot T_{\text{пов}}} \cdot P_{\text{пов}} = \frac{18}{8314 \cdot (273 + 20)} \cdot 1404 = 0,0104 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$C_F = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot T_F} \cdot P_F = \frac{18}{8314 \cdot (273 + 45)} \cdot 9580 = 0,0652 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

де  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ кг}/\text{кмоль}$  – мольна маса водяної пари;

$R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  – універсальна газова стала.

Середня температура межового шару становить

$$\bar{t} = 0,5 \cdot (t_F + t_{\text{пов}}) = 0,5 \cdot (45 + 20) = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Визначаємо густину повітря (додаток В):

- при  $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{\text{пов}} = 1,20 \text{ кг/м}^3$ ;

- при  $t_{\text{F}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{\text{F}} = 1,11 \text{ кг/м}^3$

та його коефіцієнт кінематичної в'язкості при  $\bar{t} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\nu = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Визначаємо критерій Архімеда за формулою

$$Ar = \frac{g \cdot b^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{F}}}{\rho_{\text{пов}}} = \frac{9,81 \cdot 0,4^3}{(16,6 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1,20 - 1,11}{1,20} = 1,7 \cdot 10^8.$$

Коефіцієнт молекулярної дифузії водяної пари у повітрі при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $D_0 = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Визначаємо коефіцієнт молекулярної дифузії при  $\bar{t} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{\bar{T}}{T_0}\right)^{3/2} = D_0 \cdot \left(\frac{\bar{T}}{T_0}\right)^{3/2} = 21,9 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{273 + 32,5}{273}\right)^{3/2} = 25,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Розраховуємо дифузійний критерій Прандтля за формулою

$$Pr_d = \frac{\nu}{D} = \frac{16,6 \cdot 10^{-6}}{25,9 \cdot 10^{-6}} = 0,641.$$

Визначаємо добуток

$$3 \cdot 10^6 > Ar \cdot Pr_d = 1,7 \cdot 10^8 \cdot 0,641 = 1,09 \cdot 10^8 < 2 \cdot 10^8.$$

Тоді дифузійний критерій Нуссельта за формулою (3.28) [1] становить

$$\overline{Nu}_d = 0,66 \cdot (Ar \cdot Pr_d)^{0,26} = 0,66 \cdot (1,09 \cdot 10^8)^{0,26} = 81.$$

Середній коефіцієнт масовіддачі від вільної поверхні води до повітря під час природної конвекції становить

$$\overline{\beta}_c = \frac{\overline{Nu}_d \cdot D}{b} = \frac{81 \cdot 25,9 \cdot 10^{-6}}{0,4} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$$

Потік вологи, який надходить в повітря приміщення природною конвекцією з вільної поверхні води у ванні, становить

$$M = \overline{\beta}_c \cdot F \cdot (C_{\text{F}} - C_{\text{пов}}) = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot (0,0652 - 0,0104) = \\ = 2,28 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с} = 0,821 \text{ кг/год}.$$

Питома теплота випаровування води при  $\bar{t} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$r = 2420 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$$

Кількість теплоти з випарованою вологою, яка надходить у повітря приміщення у прихованому вигляді, становитиме

$$Q_{\text{вип}} = M \cdot r = 2,28 \cdot 10^{-4} \cdot 2420 \cdot 10^3 = 552 \text{ Вт.}$$

**Приклад 5.4** Визначити середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі та тепловий потік між вільною поверхнею води і повітрям під час вимушеної конвекції. Температури: поверхні води  $t_F = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ , навколишнього повітря за сухим термометром  $t_{\text{пов}} = t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , за мокрим термометром  $t_m = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Швидкість руху повітря  $\omega_{\text{пов}} = 5 \text{ м/с}$ . Ширина поверхні води в напрямку обтікання її потоком повітря  $b = 0,4$ , довжина  $\ell = 2,0 \text{ м}$ .

Розв'язування

Середня температура повітря в межовому шарі

$$\bar{t} = (t_F + t_{\text{пов}})/2 = (45 + 20)/2 = 32,5 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Теплофізичні властивості повітря при температурі  $t = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$ :

- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,0269 \text{ Вт/(м К)}$ ;
- коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
- критерій Прандтля  $Pr = 0,712$ ;

Критерій Гухмана становить

$$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c} = \frac{20 - 15}{273 + 20} = 0,017.$$

Температурний фактор або параметричний критерій становить

$$\theta = \frac{T_c}{T_F} = \frac{273 + 20}{273 + 45} = 0,921.$$

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою

$$2,2 \cdot 10^4 < Re = (\omega_{\text{пов}} \cdot b)/\nu = (5 \cdot 0,4)/(16,6 \cdot 10^{-6}) = 1,2 \cdot 10^5 < 3,15 \cdot 10^5.$$

Отже, критерій Нуссельта визначаємо за формулою (3.30) [1]

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 0,027 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,175} \cdot \theta^2 = \\ &= 0,027 \cdot (1,2 \cdot 10^5)^{0,9} \cdot 0,712^{0,33} \cdot 0,017^{0,175} \cdot 0,921^2 = 374. \end{aligned}$$



Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі від вільної поверхні води до повітря під час вимушеної конвекції становить

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{b} = \frac{374 \cdot 0,0269}{0,4} = 25,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}).$$

Остаточо конвективний тепловий потік за законом Ньютона-Ріхмана становить

$$Q_k = \bar{\alpha}_k \cdot F \cdot (t_F - t_{\text{пов}}) = \bar{\alpha}_k \cdot b \cdot \ell \cdot (t_F - t_{\text{пов}}) = 25,2 \cdot 0,4 \cdot 2,0 \cdot (45 - 20) = 504 \text{ Вт}.$$

**Приклад 5.5** Визначити потік вологи від розбризкуваних краплин води у повітря в камері зрошення під час вимушеної конвекції (випаровування адіабатичне) і усталеного режиму роботи. Витрати води  $G_B = 22000$  кг/год при середньому діаметрі краплин води  $d_{\text{кр}} = 1,5$  мм. Витрати повітря  $G_{\text{пов}} = 12000$  кг/год при масовій швидкості повітря  $w \cdot \rho = 2,6$  кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ). Температура повітря на початку процесу  $t_{c1} = 20$  °С, в кінці –  $t_{c2} = 17$  °С, за мокрим термометром  $t_M = 15,2$  °С, а середня температура води  $t_B = t_M = 15,2$  °С. Відповідна відносна вологість повітря  $\varphi_1 = 60$  %,  $\varphi_2 = 83$  %. Довжина камери  $\ell = 1,8$  м. Підрахувати також збільшення вологовмісту повітря в процесі та кількість теплоти з випаруваною вологою.

Розв'язування

З додатку А визначаємо густину води при температурі  $t_B = 15,2$  °С:

$$\rho_B = 999 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Маса однієї краплини води при середньому діаметрі  $d_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м становить

$$m_{\text{кр}} = \rho_B \cdot (\pi \cdot d_{\text{кр}}^3 / 6) = 999 \cdot (3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 6) = 1,764 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Площа однієї краплини води при середньому діаметрі  $d_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м:

$$F_{\text{кр}} = \pi \cdot d_{\text{кр}}^2 = 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 = 7,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Середня температура за сухим термометром і середня відносна вологість повітря в процесі

$$\bar{t}_{\text{пов}} = 0,5 \cdot (t_{c1} + t_{c2}) = 0,5 \cdot (20 + 17) = 18,5 \text{ °С},$$

$$\bar{\varphi}_{\text{пов}} = 0,5 \cdot (\varphi_1 + \varphi_2) = 0,5 \cdot (60 + 83) = 71,5\%.$$

Густина повітря в процесі при  $\bar{t}_{\text{пов}} = 18,5$  °С –  $\rho_{\text{пов}} = 1,21$  кг/м<sup>3</sup>.

Середня швидкість повітря в процесі

$$\omega_{\text{пов}} = w \cdot \rho / \rho_{\text{пов}} = 2,6 / 1,21 = 2,15 \text{ м}/\text{с}.$$

Середній час взаємодії краплин води з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$\tau = \ell / \omega_{\text{пов}} = 1,8 / 2,15 = 0,84 \text{ с.}$$

Середня кількість краплин води, яка взаємодіє з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$n = (G_{\text{в}} / m_{\text{кр}}) \cdot \tau = (22000 / (3600 \cdot 1,764 \cdot 10^{-3})) \cdot 0,84 = 2910053.$$

Загальна середня площа краплин води, які взаємодіють з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$F = n \cdot F_{\text{кр}} = 2910053 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6} = 20,6 \text{ м}^2.$$

Визначаємо середній парціальний тиск насиченої водяної пари у повітрі:

$$\text{- при } \bar{t}_{\text{пов}} = 18,5 \text{ }^{\circ}\text{C} - P_{\text{пов}}^{\text{H}} = 2151 \text{ Па};$$

$$\text{- при } t_{\text{в}} = 15,2 \text{ }^{\circ}\text{C} - P_{\text{в}}^{\text{H}} = 1735 \text{ Па.}$$

За формулою для визначення відносної вологості повітря ( $\varphi = P \cdot 100 / P^{\text{H}}, \%$ ) отримуємо середній парціальний тиск водяної пари в основному потоці повітря і в насиченому водяною парою повітрі ( $\varphi_{\text{в}} = 100 \%$ ) над поверхнею краплин води в камері зрошення

$$P_{\text{пов}} = \frac{\varphi_{\text{пов}} \cdot P_{\text{пов}}^{\text{H}}}{100} = \frac{71,5 \cdot 2151}{100} = 1538 \text{ Па,}$$

$$P_{\text{в}} = P_{\text{в}}^{\text{H}} = 1735 \text{ Па.}$$

Середня температура межового шару становить

$$\bar{t} = \frac{t_{\text{в}} + \bar{t}_{\text{пов}}}{2} = \frac{15,2 + 18,5}{2} = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Визначаємо коефіцієнти динамічної та кінематичної в'язкості повітря при  $\bar{t} = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $\mu = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою

$$1 < Re = (w \cdot \rho \cdot d_{\text{кр}}) / \mu = (2,6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) / (18,3 \cdot 10^{-6}) = 213 < 220.$$

Визначаємо коефіцієнт молекулярної дифузії водяної пари у повітрі при  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $D_0 = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Визначаємо коефіцієнт молекулярної дифузії при  $\bar{t} = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  за формулою

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} = D_0 \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} = 21,9 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{273 + 16,9}{273} \right)^{3/2} = 24,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Розраховуємо дифузійний критерій Прандтля за формулою

$$Pr_d = \frac{\nu}{D} = \frac{15,1 \cdot 10^{-6}}{24,0 \cdot 10^{-6}} = 0,629.$$

Критерій Гухмана становить

$$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c} = \frac{18,5 - 15,2}{273 + 18,5} = 0,0113.$$

Отже, дифузійний критерій Нуссельта визначаємо за формулою

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_d &= 2 + 0,85 \cdot Re^{0,52} \cdot Pr_d^{0,33} \cdot Gu^{0,135} = \\ &= 2 + 0,85 \cdot 213^{0,52} \cdot 0,629^{0,33} \cdot 0,0113^{0,135} = 8,47. \end{aligned}$$

Середній коефіцієнт масовіддачі визначаємо за формулою

$$\beta_C = \frac{\overline{Nu}_d \cdot D}{d_{кр}} = \frac{8,47 \cdot 24,0 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,136 \text{ м/с.}$$

Середній коефіцієнт масовіддачі, якщо рушійною силою процесу є різниця парціальних тисків, становить

$$\overline{\beta}_p = (M_{H_2O} / (R \cdot T)) \cdot \beta_C = (18 / (8314 \cdot (273 + 16,9))) \cdot 0,136 = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м/с,}$$

де  $M_{H_2O} = 18$  кг/кмоль – мольна маса водяної пари;

$R = 8314$  Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала.

Середня густина потоку вологи від розбризкуваних краплин води у повітря в камері зрошення під час вимушеної конвекції становить

$$m_{п} = \overline{\beta}_p \cdot (P_F - P_{пов}) = 1,02 \cdot 10^{-6} \cdot (1735 - 1538) = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Середній потік вологи в камері зрошення

$$M = m \cdot F = 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 20,6 = 4,12 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} = 4,12 \text{ г/с.}$$

Збільшення вологовмісту повітря в процесі

$$\Delta d_p = M / G_{пов} = 4,12 \cdot 3600 / 12000 = 1,24 \text{ г/кг.}$$

Задане збільшення вологовмісту визначаємо за наближеною формулою

$$\Delta d = 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot (\varphi_2 \cdot P_2^H - \varphi_1 \cdot P_1^H) = 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot (83 \cdot 1962 - 60 \cdot 2340) = 1,37 \text{ г/кг.}$$

де  $P_1^H = 2340$  Па і  $P_2^H = 1962$  Па – парціальний тиск насиченої водяної пари у повітрі, відповідно, при  $t_{c1} = 20$  °С і  $t_{c2} = 17$  °С.

У зв'язку з тим, що розходження

$$(\Delta d - \Delta d_p) / \Delta d_p \cdot 100\% = (1,37 - 1,24) / 1,24 \cdot 100\% = 10\%,$$

то розрахунок не повторюємо. Якби розходження було б більшим, то необхідно змінити параметри повітря вкінці процесу  $t_{c2}$  і  $\varphi_2$  (при постійній ентальпії повітря).

Питома теплота випаровування води при  $t = 16,9$  °С,  $r = 2455$  кДж/кг.

Кількість теплоти, яка надходить у повітря з випаруваною вологою у прихованому вигляді, становить

$$Q_{\text{вип}} = M \cdot r = 4,12 \cdot 10^{-3} \cdot 2420 \cdot 10^3 = 10115 \text{ Вт.}$$

**Приклад 5.6** Визначити потік вологи, який надходить в повітря приміщення вимушеною конвекцією з вільної поверхні води у ванні. Площа ванни  $F = b \times \ell = 0,4 \times 2,0 = 0,8 \text{ м}^2$ . Температура поверхні води  $t_F = 45$  °С. Температура навколишнього повітря за сухим термометром  $t_{\text{пов}} = t_c = 20$  °С, за мокрим термометром  $t_i = 15$  °С. Відносна вологість повітря  $\varphi_{\text{пов}} = 60$  %. Ванна знаходиться в зоні дії повітряного потоку, який має швидкість  $\omega_{\text{пов}} = 5$  м/с. Напрямок руху повітря – вздовж меншого боку ванни. Підрахувати також кількість теплоти з випаруваною вологою.

#### Розв'язування

Визначаємо парціальний тиск насиченої водяної пари у повітрі:

- при  $t_{\text{пов}} = 20$  °С  $P_{\text{пов}}^H = 2340$  Па;

- при  $t_F = 45$  °С  $P_F^H = 9580$  Па.

За формулою для визначення відносної вологості повітря ( $\varphi = P \cdot 100 / P^H, \%$ ) отримаємо відповідний парціальний тиск водяної пари:

$$P_{\text{пов}} = \frac{\varphi_{\text{пов}} \cdot P_{\text{пов}}^H}{100} = \frac{60 \cdot 2340}{100} = 1404 \text{ Па,}$$

$$P_F = P_F^H = 9580 \text{ Па.}$$

Визначаємо відповідну концентрацію водяної пари

$$C_{\text{пов}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot T_{\text{пов}}} \cdot P_{\text{пов}} = \frac{18}{8314 \cdot (273 + 20)} \cdot 1404 = 0,0104 \text{ кг/м}^3,$$

$$C_F = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot T_F} \cdot P_F = \frac{18}{8314 \cdot (273 + 45)} \cdot 9580 = 0,0652 \text{ кг/м}^3,$$

де  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$  кг/кмоль – мольна маса водяної пари;

$R = 8314$  Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала.

Середня температура межового шару становить

$$\bar{t} = 0,5 \cdot (t_F + t_{\text{пов}}) = 0,5 \cdot (45 + 20) = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Визначаємо коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при  $\bar{t} = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  –  
 $\nu = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою

$$2,2 \cdot 10^4 < Re = (\omega_{\text{він}} \cdot b) / \nu = (5 \cdot 0,4) / (16,6 \cdot 10^{-6}) = 1,2 \cdot 10^5 < 3,15 \cdot 10^5.$$

Визначаємо коефіцієнт молекулярної дифузії водяної пари у повітрі при  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  –  $D_0 = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$

Визначаємо коефіцієнт молекулярної дифузії при  $\bar{t} = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} = D_0 \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} = 21,9 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{273 + 32,5}{273} \right)^{3/2} = 25,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Розраховуємо дифузійний критерій Прандтля

$$Pr_d = \frac{\nu}{D} = \frac{16,6 \cdot 10^{-6}}{25,9 \cdot 10^{-6}} = 0,641.$$

Критерій Гухмана

$$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c} = \frac{20 - 15}{273 + 20} = 0,017.$$

Температурний фактор або параметричний критерій

$$\theta = \frac{T_c}{T_F} = \frac{273 + 20}{273 + 45} = 0,921.$$

Отже, дифузійний критерій Нуссельта визначаємо за формулою

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_d &= 0,248 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr_d^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \theta^2 = \\ &= 0,248 \cdot (1,2 \cdot 10^5)^{0,9} \cdot 0,641^{0,33} \cdot 0,017^{0,135} \cdot 0,921^2 = 390. \end{aligned}$$

Середній коефіцієнт масовіддачі від вільної поверхні води до повітря під час вимушеної конвекції

$$\bar{\beta}_c = \frac{\overline{Nu}_d \cdot D}{b} = \frac{390 \cdot 25,9 \cdot 10^{-6}}{0,4} = 0,025 \text{ м/с}.$$

Потік вологи, яка надходить в повітря приміщення вимушеною конвекцією з вільної поверхні води у ванні, визначаємо за формулою

$$M = \bar{\beta}_C \cdot F \cdot (C_F - C_{\text{пов}}) = 0,025 \cdot 0,8 \cdot (0,0652 - 0,0104) = \\ = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} = 3,96 \text{ кг/год.}$$

Питома теплота випаровування води при  $\bar{t} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$   $r = 2420 \text{ кДж/кг}$ .

Кількість теплоти з випаруваною вологою, яка надходить у повітря приміщення у прихованому вигляді, становить

$$Q_{\text{вип}} = M \cdot r = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2420 \cdot 10^3 = 2662 \text{ Вт.}$$

Вода в резервуарі в спокійному стані, то  $t_F$  нижча за середню температуру товщі води  $\bar{t}_B$ . При  $t_B \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$  ця різниця становить близько  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , при  $t_B = 70 \dots 75 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Із наближенням до температури кипіння ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) різниця температур знижується до  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Приклад 5.7** Визначити конвективний тепловий потік від повітря до розбризкуваних краплин води в камері зрошення під час вимушеної конвекції (випаровування адіабатичне) і усталеного режиму роботи. Витрата повітря  $G_{\text{пов}} = 22000 \text{ кг/год}$  при масовій швидкості повітря  $w \cdot \rho = 2,6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Температура повітря на початку процесу  $t_{c1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , в кінці –  $t_{c2} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ , за мокрим термометром  $t_M = 15,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , а середня температура води  $t_B = t_M = 15,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Довжина камери  $\ell = 1,8 \text{ м}$ .

#### Розв'язування

За додатком А густина води при температурі  $t_B = 15,2 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rho_B = 999 \text{ кг/м}^3$ .

Маса однієї краплини води при середньому діаметрі  $d_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  становить

$$m_{\text{кр}} = \rho_B \cdot (\pi \cdot d_{\text{кр}}^3 / 6) = 999 \cdot (3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 6) = 1,764 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Площа однієї краплини води при середньому діаметрі  $d_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$F_{\text{кр}} = \pi \cdot d_{\text{кр}}^2 = 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 = 7,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Середня температура повітря в процесі за сухим термометром:

$$\bar{t}_{\text{пов}} = 0,5 \cdot (t_{c1} + t_{c2}) = 0,5 \cdot (20 + 17) = 18,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

Густина повітря (див. додаток В) в процесі при  $\bar{t}_{\text{пов}} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$  становить:

$$\rho_{\text{пов}} = 1,21 \text{ кг/м}^3.$$

Середня швидкість повітря в процесі

$$\omega_{\text{пов}} = w \cdot \rho / \rho_{\text{пов}} = 2,6 / 1,21 = 2,15 \text{ м/с.}$$

Середній час взаємодії краплини води з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$\tau = \ell / \omega_{\text{пов}} = 1,8 / 2,15 = 0,84 \text{ с.}$$

Середня кількість краплин води, які взаємодіють з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$n = (G_{\text{в}} / m_{\text{кр}}) \cdot \tau = (22000 / (3600 \cdot 1,764 \cdot 10^{-3})) \cdot 0,84 = 2910053.$$

Загальна середня площа краплин води, які взаємодіють з повітрям безпосередньо в камері зрошення

$$F = n \cdot F_{\text{кр}} = 2910053 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6} = 20,6 \text{ м}^2.$$

Середня температура межового шару становить:

$$\bar{t} = \frac{t_{\text{в}} + \bar{t}_{\text{пов}}}{2} = \frac{15,2 + 18,5}{2} = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Теплофізичні властивості повітря (див. додаток В) при  $\bar{t} = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

- коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;

- критерій Прандтля  $Pr = 0,7173$ ;

- критерій Гухмана становить

$$Gu = \frac{T_{\text{с}} - T_{\text{м}}}{T_{\text{с}}} = \frac{18,5 - 15,2}{273 + 18,5} = 0,0113.$$

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою

$$1 < Re = (w \cdot \rho \cdot d_{\text{кр}}) / \mu = (2,6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) / (18,3 \cdot 10^{-6}) = 213 < 220$$

Отже, критерій Нуссельта визначаємо за залежністю

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 2 + 1,07 \cdot Re^{0,48} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,175} = \\ &= 2 + 1,07 \cdot 213^{0,52} \cdot 0,7173^{0,33} \cdot 0,0113^{0,175} = 7,74. \end{aligned}$$

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі становить

$$\bar{\alpha}_{\text{к}} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{d_{\text{кр}}} = \frac{7,74 \cdot 0,0257}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 132,6 \text{ Вт/(м}^2\text{ К)}.$$

Остаточний конвективний тепловий потік за законом Ньютона – Ріхмана

$$Q_{\text{к}} = \bar{\alpha}_{\text{к}} \cdot F \cdot (\bar{t}_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) = 132,6 \cdot 20,6 \cdot (18,5 - 15,2) = 9014 \text{ Вт.}$$

## 5.2 Задачі для самостійної роботи

**Приклад 5.8** Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі та тепловий потік від насиченої водяної пари зі швидкістю  $\omega_{\text{п}}$ , яка конденсується на поверхні шахового пучка горизонтальних труб діаметром  $d_3 \times \delta$ , при абсолютному тискові  $P_{\text{н}} = 101,3 + 79,5 = 180,8$  кПа в присутності  $\bar{y}_{\text{пов}}$  (мас.) повітря, якщо кількість труб у вертикальному ряду  $m$ , загальна кількість труб  $n$ , довжина труб  $\ell$ , середня температура стінки труби  $\bar{t}_{\text{F}}$ .

Остання цифра шифру	$\omega_{\text{п}}$ , м/с	$\bar{t}_{\text{F}}$ , °C	$\bar{y}_{\text{пов}}$ , %	Передостання цифра шифру	$d_3 \times \delta$ , мм	$m$	$n$	$\ell$ , м
0	0	105	1	0	25×2	4	12	0,5
1	0,83	106	6	1	32×3	5	15	0,6
2	4,2	104	2	2	33×3	6	18	0,7
3	13,5	107	2	3	25×2	7	21	0,8
4	13,5	105	8	4	32×3	6	18	0,9
5	4,2	106	6	5	33×3	7	21	1,0
6	0,83	107	8	6	33×3	4	12	0,6
7	0	104	2	7	25×2	5	15	0,7
8	0	106	3	8	32×3	7	21	0,9
9	0,83	105	4	9	25×2	6	18	0,5

**Приклад 5.9** Визначити середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі та тепловий потік між вільною плоскою поверхнею води і повітрям під час природної конвекції. Температура поверхні води  $t_{\text{F}}$ , навколишнього повітря –  $t_{\text{пов}}$ . Ширина поверхні води  $b$ , довжина  $\ell$ .

Дані необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці.

Остання цифра шифру	$t_{\text{F}}$ , °C	$t_{\text{пов}}$ , °C	Передостання цифра шифру	$b$ , м	$\ell$ , м
0	45	20	0	0,4	1,9
1	46	19	1	0,41	1,8
2	47	18	2	0,42	1,7
3	45	18	3	0,43	2,0
4	46	20	4	0,44	1,9
5	47	19	5	0,43	1,8
6	45	19	6	0,42	2,0
7	44	20	7	0,41	1,9
8	43	18	8	0,40	1,8
9	46	18	9	0,41	1,7

**Приклад 5.10** Визначити потік вологи, яка надходить в повітря приміщення природною конвекцією з вільної поверхні води у ванні. Площа ванни  $F = b \times \ell$ , м<sup>2</sup>. Температура поверхні води  $t_{\text{F}}$ . Температура навколишнього повітря  $t_{\text{пов}}$ , відносна вологість  $\phi_{\text{пов}}$ . Підрахувати також кількість теплоти з випаруваною вологою. Обчисліть кількість теплоти за рахунок тепломасообміну, використавши умову прикладу 5.9.



Остання цифра шифру	$t_F, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{пов}}, \%$	Передостання цифра шифру	$b, \text{ м}$	$\ell, \text{ м}$
0	45	20	61	0	0,4	1,9
1	46	19	60	1	0,41	1,8
2	47	18	62	2	0,42	1,7
3	45	18	60	3	0,43	2,0
4	46	20	59	4	0,44	1,9
5	47	19	61	5	0,43	1,8
6	45	19	62	6	0,42	2,0
7	44	20	60	7	0,41	1,9
8	43	18	61	8	0,40	1,8
9	46	18	59	9	0,41	1,7

**Приклад 5.11** Визначити середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі та тепловий потік між вільною поверхнею води і повітрям під час вимушеної конвекції. Температури поверхні води  $t_F$ , навколишнього повітря за сухим термометром  $t_{\text{пов}} = t_c$ , за мокрим термометром  $t_m$ . Швидкість руху повітря  $\omega_{\text{пов}}$ . Ширина поверхні води в напрямку обтікання її потоком повітря  $b$ , довжина –  $\ell$ .

Остання цифра шифру	$t_F, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	Передостання цифра шифру	$\omega_{\text{пов}}, \text{ м/с}$	$b, \text{ м}$	$\ell, \text{ м}$
0	46	18	13	0	5	0,41	1,7
1	43	18	12	1	4,9	0,40	1,8
2	44	20	15	2	4,8	0,41	1,9
3	45	19	14	3	4,7	0,42	2,0
4	47	19	13	4	4,6	0,43	1,8
5	46	20	14	5	4,5	0,44	1,9
6	45	18	13	6	5,0	0,43	2,0
7	47	18	14	7	4,9	0,42	1,7
8	46	19	15	8	5,1	0,41	1,8
9	45	20	16	9	4,7	0,40	1,9

**Приклад 5.12** Визначити потік вологи, який надходить в повітря приміщення вимушеною конвекцією з вільної поверхні води у ванні. Площа ванни  $F = b \times \ell \text{ м}^2$ . Температура поверхні води  $t_F$ . Температура навколишнього повітря за сухим термометром  $t_{\text{пов}} = t_c$ , за мокрим термометром  $t_m$ . Відносна вологість повітря  $\varphi_{\text{пов}}$ . Ванна знаходиться в зоні дії повітряного потоку, який має швидкість  $\omega_{\text{пов}}$ . Напрямок руху повітря – вздовж меншого боку ванни. Підрахувати також кількість теплоти з випаруваною вологою. Обчисліть кількість теплоти за рахунок тепломасообміну, використавши умову прикладу 5.1.

Остання цифра шифру	$t_F, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$t_M, ^\circ\text{C}$	$\Phi_{\text{пов}}, \%$	Передостання цифра шифру	$\omega_{\text{пов}}, \text{м/с}$	$b, \text{м}$	$\ell, \text{м}$
0	46	18	13	62	0	5	0,41	1,7
1	43	18	12	60	1	4,9	0,40	1,8
2	44	20	15	61	2	4,8	0,41	1,9
3	45	19	14	59	3	4,7	0,42	2,0
4	47	19	13	60	4	4,6	0,43	1,8
5	46	20	14	62	5	4,5	0,44	1,9
6	45	18	13	61	6	5,0	0,43	2,0
7	47	18	14	60	7	4,9	0,42	1,7
8	46	19	15	61	8	5,1	0,41	1,8
9	45	20	16	59	9	4,7	0,40	1,9

**Приклад 5.13** Визначити конвективний тепловий потік від повітря до розбризкуваних краплин води в камері зрошення під час вимушеної конвекції (випаровування адіабатичне) і усталеного режиму роботи. Витрата води  $G_B$  при середньому діаметрі краплин  $\bar{d}_{\text{кр}}$ . Витрата повітря  $G_{\text{пов}}$  при масовій швидкості повітря  $w \cdot \rho$ . Температура повітря на початку процесу  $t_{c1}$ , в кінці –  $t_{c2}$ , за мокрим термометром  $t_M$ , а середня температура води  $t_B = t_M$ . Довжина камери  $\ell$ .

Остання цифра шифру	$G_B, \text{т/ГОД}$	$\bar{d}_{\text{кр}}, \text{мм}$	$G_{\text{пов}}, \text{т/ГОД}$	$w \cdot \rho, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Передостання цифра шифру	$t_{c1}, ^\circ\text{C}$	$t_{c2}, ^\circ\text{C}$	$t_M, ^\circ\text{C}$	$\ell, \text{м}$
0	22	1,5	12	2,6	0	20	17	15,2	1,8
1	23	1,6	13	2,5	1	19	16	14,2	1,9
2	21	1,4	12	2,4	2	18	15	13,3	2,0
3	20	1,3	11	2,7	3	18	14	12,2	1,9
4	23	1,5	12	2,5	4	19	15	13,1	1,8
5	22	1,4	11	2,6	5	20	16	14,3	2,0
6	21	1,5	13	2,4	6	18	13	11,2	1,8
7	20	1,5	12	2,7	7	19	17	15,1	1,9
8	21	1,3	11	2,6	8	19	15	13,2	1,9
9	22	1,3	13	2,5	9	20	16	14,1	1,8

**Приклад 5.14** Визначити потік вологи від розбризкуваних краплин води у повітря в камері зрошення під час вимушеної конвекції (випаровування адіабатичне) і усталеного режиму роботи. Витрати води  $G_B$  при середньому діаметрі краплин води  $\bar{d}_{\text{кр}}$ . Витрати повітря  $G_{\text{пов}}$  при масовій швидкості повітря  $w \cdot \rho$ . Температура повітря на початку процесу  $t_{c1}$ , в кінці –  $t_{c2}$ , за мокрим термометром  $t_M$ , а середня температура води  $t_B = t_M$ . Відповідна відносна вологість повітря  $\phi_1$  та  $\phi_2$ . Довжина камери  $\ell$ . Підрахувати також збільшення вологовмісту повітря в процесі та кількість теплоти з випарованою вологою. Обчисліть кількість теплоти за рахунок тепломасообміну, використавши умову прикладу 5.2.

Остання цифра шифру	$G_{в}$ , т/ГОД	$\bar{d}_{кр}$ , мм	$G_{пов}$ , т/ГОД	$w \cdot \rho$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Передостання цифра шифру	$t_{c1}$ , °C	$t_{c2}$ , °C	$t_m$ , °C	$\varphi_1$ , %	$\varphi_2$ , %	$l$ , м
0	22	1,5	12	2,6	0	20	17	15,2	60	83	1,8
1	23	1,6	13	2,5	1	19	16	14,2	61	84	1,9
2	21	1,4	12	2,4	2	18	15	13,3	62	85	2,0
3	20	1,3	11	2,7	3	18	14	12,2	59	82	1,9
4	23	1,5	12	2,5	4	19	15	13,1	58	81	1,8
5	22	1,4	11	2,6	5	20	16	14,3	60	82	2,0
6	21	1,5	13	2,4	6	18	13	11,2	62	84	1,8
7	20	1,5	12	2,7	7	19	17	15,1	58	80	1,9
8	21	1,3	11	2,6	8	19	15	13,2	59	81	1,9
9	22	1,3	13	2,5	9	20	16	14,1	61	85	1,8

### Контрольні запитання

1. Поясніть поняття: дифузія, густина потоку маси, закон Фіка.
2. Проаналізуйте молекулярне перенесення маси (концентраційна дифузія, термодифузія, бародифузія).
3. Поясніть конвективне перенесення маси.
4. Поясніть перенесення ентальпії.
5. Проаналізуйте густину теплового потоку в суміші.
6. Проаналізуйте тепло- і масовіддачу в багатокомпонентних середовищах.
7. Проаналізуйте дифузійний межовий шар.
8. Як впливає наявність в парі газу, який не конденсується, на тепло- і масообмін при конденсації пари?
9. Поясніть розподіл концентрацій і температури при конденсації із парогазової суміші.
10. Як визначається теплота фазового переходу на поверхні поділу фаз?
11. Як визначається загальна кількість теплоти, яка передається поверхні плівки при конденсації пари із парогазової суміші?
12. Як визначається питомий тепловий потік на твердій стінці при конденсації пари із парогазової суміші?
13. Поясніть фізичний зміст  $\bar{\alpha}_{сум}$  в залежності  $q_c = \bar{\alpha}_{сум} \cdot (t_n - \bar{t}_f)$ .
14. Як визначити сумарний термічний опір при конденсації пари із парогазової суміші на твердій стінці?
15. Поясніть фізичний зміст дифузійного термічного опору.
16. Наведіть приклад методу визначення коефіцієнта тепловіддачі від пароповітряної суміші до твердої стінки.
17. Яка різниця між критеріальними рівняннями для визначення тепловіддачі і масовіддачі природною конвекцією між вільною плоскою поверхнею води і повітрям?
18. Яка різниця між критеріальними рівняннями для визначення тепловіддачі і масовіддачі між вільною плоскою поверхнею води і повітрям під час вимушеної конвекції повітря?
19. Яка різниця між критеріальними рівняннями для визначення тепловіддачі з поверхні краплин води до повітря?
20. Проаналізуйте особливості розрахунків інтенсивності теплообміну в складних багатокомпонентних органічних сумішах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ткаченко С. Й. Тепломасообмін і гідродинаміка багатоконпонентних середовищ / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 105 с.
2. Альтшуль А. Д. Примеры расчетов по гидравлике : учебное пособие для вузов. / Альтшуль А. Д., Калицун В. И., Майрановський Ф. Г. и др. ; под ред. Альтшуля А. Д. – М. : Стройиздат, 1975. – 255 с.
3. Баттерворс Д. Теплопередача в двухфазном потоке / Д. Баттерворс, Г. Хьюитт ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1980. – 328 с.
4. Безродный М. К. Гидродинамика и контактный теплообмен в некоторых газожидкостных системах : моногр. / Безродный М. К., Барабаш П. А., Голянд Н. Н. – К. : НТУУ «КПИ», 2001. – 408 с.
5. Гидравлический расчет котельных агрегатов : Нормативный метод / [Балдина О. М., Локшин В. А., Петерсон Д. Ф. и др. ; под ред. В. А. Локшина и др.]. – М. : Энергия, 1978. – 256 с.
6. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / Горбис З. Р. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.
7. Дейч М. Е. Газодинамика : учеб. пособие для вузов / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
8. Исаченко В. П. Теплопередача / Исаченко В. П., Осипов В. А., Сукомел А. С. – М. : Энергия, 1981. – 416 с.
9. Кутепов А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г., 3-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 1986. – 448 с.
10. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с.
11. Лобай В. Й. Тепломасообмін : підручник для ВНЗ / Лобай В. Й. – Львів : Тріада Плюс, 1988. – 260 с.
12. Ткаченко С. Й. Самозакипаючі потоки в дренажних каналах тепло-технологічних систем : монографія / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова. – Вінниця : Універсум-Вінниця. – 2008. – 161 с.
13. Федоткин И. М. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах / И. М. Федоткин, С. И. Ткаченко. – К. : Техника, 1975. – 212 с.
14. Богословский В. Н. Отопление и вентиляция : учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 2 Вентиляция // [Богословский В. Н., Новожилов В. И., Симаков Б. Д. и др.] ; под ред. Богословского В. Н. – М. : Стройиздат, 1976. – 439 с.
15. Альтман Е. І. Фізична гідромеханіка і теплообмін у багатозфазних потоках : посібник для практичних занять / Альтман Е. І. – Одеська державна академія холоду, 2008. – 22 с.

## Додаток А

Таблиця А.1 – Теплофізичні властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ бар}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$C_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a, 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\mu, 10^{-6}, \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu, 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta, 10^{-4}, \text{ 1/К}$	$\sigma, 10^{-4}, \text{ кГ/м}$	$Pr$
0	1,01	999,9	4,212	0,551	1,31	1787,8	1,789	-0,63	77,1	13,67
10	1,01	999,7	4,191	0,574	1,37	1305,3	1,306	+0,7	75,6	9,52
20	1,01	998,2	4,183	0,599	1,43	1004,2	1,0006	1,82	74,1	7,02
30	1,01	995,7	4,174	0,618	1,49	801,5	0,805	3,21	71,2	5,52
40	1,01	992,2	4,174	0,634	1,53	653,2	0,659	3,87	71,0	4,31
50	1,01	988,1	4,174	0,649	1,57	549,4	0,556	4,49	67,7	3,54
60	1,01	983,2	4,178	0,659	1,60	468,8	0,478	5,11	67,5	2,98
70	1,01	977,8	4,187	0,668	1,63	406,1	0,415	5,70	64,4	2,55
80	1,01	971,8	4,195	0,674	1,66	355,0	0,365	6,32	63,8	2,21
90	1,01	965,3	4,208	0,680	1,68	314,9	0,326	6,95	60,7	1,95
100	1,01	958,4	4,220	0,683	1,69	383,4	0,295	7,52	60,0	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,685	1,70	259,0	0,272	8,08	56,9	1,60
120	1,99	943,1	4,25	0,686	1,71	237,3	0,252	8,64	55,9	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,686	1,72	217,8	0,233	9,19	52,9	1,36
140	3,62	926,1	4,287	0,685	1,72	201,0	0,217	9,72	51,7	1,26
150	4,76	917,0	4,313	0,684	1,73	186,4	0,203	10,3	48,7	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,683	1,73	173,6	0,191	10,7	47,5	1,10
170	7,92	897,3	4,380	0,679	1,73	162,8	0,181	11,3	44,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,674	1,72	153,0	0,173	11,9	43,1	1,00
190	12,55	876,0	4,459	0,670	1,71	144,2	0,165	12,6	40,0	0,96
200	15,55	863,0	4,505	0,663	1,70	136,3	0,158	13,3	38,4	0,93
220	23,20	840,3	4,614	0,646	1,66	124,6	0,148	14,8	33,8	0,89
240	33,48	813,6	4,756	0,628	1,62	114,7	0,141	16,8	29,1	0,87
260	46,59	784,0	4,949	0,605	1,56	105,9	0,135	19,7	24,2	0,87
280	64,20	750,7	5,229	0,574	1,46	98,1	0,131	23,7	19,5	0,90
300	85,92	712,5	5,736	0,540	1,32	91,2	0,128	29,2	14,7	0,97
320	112,90	667,1	6,573	0,506	1,15	85,3	0,128	38,2	10,0	1,11
340	146,08	610,1	8,164	0,457	0,92	77,5	0,127	53,4	5,78	1,39
360	186,81	528,0	13,98	0,396	0,54	66,7	0,126	109,0	2,06	2,35
370	210,54	450,5	40,42	0,337	0,18	56,9	0,126	264,0	0,48	6,79

## Додаток Б

Таблиця Б.1 – Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення

Р, бар	t, °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	ρ'', кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,9575
0,015	13,038	0,0010007	87,9	0,01138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,5	2539	2451	0,3124	8,642
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,055	34,59	0,0010059	25,77	0,03880	144,95	2564	2419	0,4993	8,359
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,065	37,65	0,0010070	22,02	0,04542	157,68	2570	2412	0,5406	8,300
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,075	40,32	0,0010080	19,23	0,05198	168,8	2574	24,05	0,05764	8,250
0,080	41,54	0,0010085	18,1	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,085	42,69	0,0010090	17,1	0,05849	178,7	2578	2399	0,608	8,206
0,090	43,79	0,0010094	16,2	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,095	44,84	0,0010098	15,4	0,06493	187,7	2582	2394	0,6362	8,167
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,11	47,72	0,0010111	13,4	0,07462	199,7	2588	2388	0,674	8,116
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207	2591	2384	0,6966	8,085
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,15	54	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373	0,755	8,007
0,16	55,34	0,0010147	9,429	0,106	231,7	2601	2369	0,7722	7,984
0,17	56,61	0,0010153	8,909	0,1123	236,9	2603	2366	0,7884	7,963
0,18	57,82	0,0010159	8,444	0,1185	241,9	2605	2363	0,8038	7,944
0,19	58,98	0,0010165	8,025	0,1247	246,7	2607	2360	0,8183	7,925
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,21	61,14	0,0010177	7,304	0,1369	255,9	2611	2355	0,8453	7,89
0,22	62,16	0,0010183	6,992	0,143	260,2	2613	2353	0,8581	7,847
0,23	63,14	0,0010188	6,708	0,1491	264,3	2614	2350	0,8703	7,859
0,24	64,08	0,0101930	6,445	0,1551	268,2	2616	2348	0,8821	7,844
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272	2618	2346	0,8934	7,83
0,26	65,88	0,0010204	5,977	0,1673	275,7	2620	2344	0,9043	7,816
0,27	66,73	0,0010209	5,769	0,1733	279,3	2621	2342	0,9147	7,803
0,28	67,55	0,0010214	5,576	0,1793	282,7	2623	2640	0,9248	7,791
0,29	68,35	0,0010218	5,395	0,1853	286	2624	2338	0,9346	7,779
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,32	70,6	0,0010232	4,922	0,20322	295,5	2627	2332	0,9625	7,745
0,34	72,02	0,001024	4,65	0,2151	301,5	2630	2328	0,9796	7,724
0,36	73,36	0,0010248	4,407	0,2269	307,1	2632	2325	0,9958	7,705

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,38	74,64	0,0010256	4,189	0,2387	312,5	2634	2322	1,0113	7,687
0,4	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,67
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311	1,0601	7,229
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311	1,0601	7,229
0,5	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,091	7,593
0,55	83,74	0,0010315	2,963	0,3375	350,7	2649	2298	1,1193	7,561
0,6	85,95	0,001033	2,732	0,3661	360	2653	2293	1,1453	7,531
0,65	88,02	0,0010345	2,534	0,3946	368,6	2657	2288	1,1693	7,504
0,7	89,97	0,0010359	2,364	0,423	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,75	91,8	0,0010372	2,216	0,4512	384,5	2663	2278	1,213	7,456
0,8	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,233	7,434
0,85	95,16	0,0010397	1,972	0,5071	398,7	2668	2269	1,2518	7,414
0,9	96,72	0,0010409	1,869	0,535	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,95	98,21	0,0010421	1,777	0,5627	411,5	2673	2261	1,2865	7,376
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,36
1,1	102,32	0,0010452	1,55	0,6453	428,9	2679	2250	1,3227	7,328
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
1,4	109,33	0,001051	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,455	7,202
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,0010591	0,929	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,547	7,111
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,563	7,096
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524	2713	2189	1,5783	7,081
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,34	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,04
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,2	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167	1,66	7,003
3	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,85	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,01	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,32	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
4,6	148,73	0,0010892	0,4054	2,467	626,9	2745	2118	1,829	6,85
4,7	149,53	0,0010901	0,3973	2,517	630,3	2746	2116	1,837	6,843
4,8	150,31	0,001091	0,3895	2,568	633,7	2747	2113	1,845	6,835
4,9	151,08	0,0010918	0,3819	2,618	636,9	2748	2111	1,853	6,828
5	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,86	6,822
5,2	153,32	0,0010943	0,3612	2,769	646,5	2750	2104	1,875	6,809
5,4	154,76	0,001096	0,3485	2,869	652,7	2752	2099	1,89	6,796
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095	1,904	6,784
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095	1,904	6,784
5,8	157,52	0,0010992	0,3258	3,069	664,7	2755	2090	1,918	6,772
6	158,84	0,0011007	0,3156	3,16	670,5	2757	2086	1,931	6,761
6,2	160,12	0,0011022	0,306	3,268	676	2758	2082	1,944	6,75
6,4	161,37	0,0011037	0,297	3,367	681,5	2760	2078	1,956	6,739
6,6	162,59	0,0011052	0,2885	3,467	686,9	2761	2074	1,968	6,729
6,8	163,79	0,0011066	0,2804	3,566	692,1	2762	2070	1,98	6,719
7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
7,2	166,1	0,0011095	0,2656	3,765	702,2	2765	2063	2,003	6,699
7,4	167,21	0,0011109	0,2588	3,864	707,1	2766	2059	2,014	6,69
7,6	168,3	0,0011123	0,2523	3,963	711,8	2767	2055	2,025	6,681
7,8	169,37	0,0011136	0,2462	4,062	716,4	2768	2052	2,036	6,672
8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
8,2	171,44	0,0011162	0,2347	4,26	725,4	2770	2045	2,056	6,655
8,4	172,44	0,0011175	0,2294	4,359	729,8	2771	2041	2,066	6,647
8,6	173,43	0,0011187	0,2243	4,458	734,2	2772	2038	2,076	6,639
8,8	174,4	0,00112	0,2195	4,556	738,6	2773	2034	2,085	6,631
9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
9,2	176,29	0,0011225	0,2104	4,753	746,9	2775	2028	2,103	6,615
9,4	177,21	0,0011237	0,2061	4,852	750,9	2776	2025	2,112	6,608
9,6	178,12	0,0011249	0,202	4,949	754,8	2777	2022	2,121	6,601
9,8	179,01	0,0011261	0,1982	5,045	758,8	2778	2019	2,130	6,594
10	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
10,5	182,00	0,0011303	0,1856	5,388	772,1	2779	2007	2,159	6,570
11	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
11,5	186,04	0,0011358	0,1701	5,879	789,8	2783	1993	2,198	6,538
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
12,5	189,8	0,0011412	0,157	6,369	806,5	2786	1980	2,234	6,509
13	191,6	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
13,5	193,34	0,0011464	0,1458	6,859	822,3	2789	1967	2,268	6,482
14	195,04	0,001149	0,1408	7,103	830	2790	1960	2,284	6,469
14,5	196,68	0,0011515	0,1361	7,348	837,4	2791	1954	2,299	6,457
15	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
15,5	199,84	0,0011563	0,1276	7,837	851,5	2793	1941	2,329	6,433
16	201,36	0,0011586	0,1238	8,08	858,3	2793	1935	2,344	6,422
16,5	202,85	0,0011609	0,1201	8,325	865	2794	1929	2,358	6,411



Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	204,3	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,40
17,5	205,72	0,0011655	0,1135	8,812	878,1	2796	1918	2,384	6,389
18	207,1	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
18,5	208,45	0,0011700	0,1075	9,303	890,6	2797	1907	2,41	6,369
19	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896	2,435	6,350
20	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
20,5	213,62	0,0011788	0,09719	10,29	914,2	2800	1886	2,458	6,331
21	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,47	6,322
21,5	216,05	0,001183	0,09276	10,78	925,4	2800	1875	2,481	6,314
22	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
22,5	218,41	0,0011872	0,08869	11,28	936,3	2801	1865	2,503	6,297
23	219,5	0,0011892	0,8679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
23,5	220,67	0,0011912	0,08498	11,77	946,7	2802	1855	2,524	6,28
24	221,77	0,0011932	0,8324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
24,5	222,85	0,0011952	0,08156	12,26	956,8	2802	1845	2,544	6,264
25	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
25,5	224,99	0,0011992	0,07837	12,76	966,8	2803	1836	2,564	6,249
26	226,03	0,0012012	0,7688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
26,5	227,05	0,0012031	0,07545	13,25	976,6	2803	1820	2,582	6,234
27	228,06	0,001205	0,07406	13,5	981,3	2803	1822	2,592	6,227
27,5	229,06	0,0012069	0,07271	13,75	985,9	2803	1817	2,602	6,22
28	230,04	0,0012088	0,07141	14	990,4	2803	1813	2,611	6,213
28,5	231,01	0,0012107	0,07016	14,25	994,9	2803	1808	2,62	6,206
29	231,96	0,0012126	0,06895	14,5	999,4	2803	1804	2,628	6,199
29,5	232,9	0,0012145	0,06778	14,75	1003,8	2804	1800	2,637	6,193
30	233,83	0,0012163	0,06665	15	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
31	235,66	0,0012201	0,0645	15,5	1016,9	2804	1787	2,662	6,173
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
33	239,18	0,0012274	0,06055	16,52	1033,7	2803	1769	2,695	6,149
34	240,88	0,001231	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,71	6,137
35	242,54	0,0012345	0,05704	17,53	1049,8	2803	1753	2,725	6,152
36	244,16	0,001238	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,74	6,113
37	245,75	0,0012415	0,05391	18,55	1065,2	2802	1737	2,755	6,102
38	247,31	0,001245	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
39	248,84	0,0012485	0,05108	19,58	1080,2	2801	1721	2,783	6,081
40	250,33	0,001252	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,07
41	251,8	0,0012554	0,04852	20,61	1094,7	2800	1705	2,81	6,059
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
43	254,66	0,0012622	0,04617	21,66	1108,5	2799	1691	2,836	6,039
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
45	257,41	0,001269	0,04404	22,71	1122,1	2798	1676	2,862	6,02
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,01
47	260,07	0,0012757	0,0421	23,76	1135,4	2796	1661	2,886	6,001
48	261,37	0,001279	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
49	262,65	0,0012824	0,04029	24,82	1148,2	2795	1647	2,909	5,982
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
51	265,15	0,001289	0,03863	25,89	1160,6	2793	1632	2,932	5,964
52	266,38	0,0012923	0,03784	26,43	1166,8	2792	1625	2,943	5,956
53	267,58	0,0012955	0,03708	26,97	1172,9	2791	1618	2,954	5,947
54	268,77	0,0012988	0,03635	27,51	1179	2791	1612	2,965	5,939
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,93
56	271,1	0,0013054	0,03495	28,61	1190,8	2789	1597,7	2,987	5,922
57	272,24	0,0013087	0,03429	29,16	1196,6	2788	1591	2,997	5,914
58	273,6	0,001312	0,03365	29,72	1202,4	2786	1584,3	3,007	5,906
59	274,47	0,0013152	0,03303	30,28	1208,2	2786	1577,6	3,017	5,898
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,89
61	276,64	0,0013217	0,03185	31,4	1219,6	2784	1564,1	3,037	5,882
62	277,71	0,001325	0,0313	31,95	1225,1	2782	1557,4	3,047	5,874
63	278,76	0,0013282	0,03076	32,51	1230,6	2781	1550,7	3,057	5,866
64	279,8	0,0013314	0,03024	33,07	1236	2780	1544,1	3,066	5,859
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
66	281,85	0,001338	0,02923	34,21	1246,6	2778	1530,9	3,085	5,844
67	282,86	0,0013412	0,02874	34,79	1251,8	2776	1524,4	3,095	5,836
68	283,85	0,0013445	0,02827	35,37	1257	2775	1517,9	3,104	5,829
69	284,83	0,0013478	0,02782	35,95	1262,2	2773	1511,4	3,113	5,822
70	285,8	0,001351	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
71	286,76	0,0013542	0,02694	37,12	1272,5	2771	1498,4	3,131	5,807
72	287,71	0,0013574	0,02652	37,71	1277,6	2769	1492	3,14	5,8
73	288,65	0,0013607	0,02611	38,3	1282,6	2768	1485,6	3,149	5,793
74	289,58	0,001364	0,02571	38,89	1287,6	2767	1479,2	3,158	5,786
75	290,5	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
76	291,41	0,0013706	0,02494	40,09	1297,7	2764	1466,4	3,174	5,772
77	292,32	0,0013739	0,02457	40,7	1302,6	2763	1460	3,183	5,765
78	293,22	0,0013772	0,02421	41,3	1307,4	2761	1453,7	3,192	5,758
79	294,1	0,0013805	0,02386	41,91	1312,2	2759	1447,4	3,2	5,751
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317	2758	1441,1	3,208	5,745
81	295,85	0,0013872	0,02318	43,14	1321,8	2757	1434,8	3,216	5,738
82	296,71	0,0013905	0,02285	43,76	1326,6	2755	1428,5	3,224	5,731
83	297,56	0,0013938	0,02253	44,38	1331,4	2753	1422,2	3,232	5,724
84	298,4	0,0013972	0,02222	45	1336,1	2752	1416	3,24	5,717
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
86	300,07	0,0014039	0,02162	46,25	1345,4	2749	1403,7	3,255	5,704
87	300,89	0,0014073	0,02132	46,9	1350,1	2747	1397,6	3,263	5,698
88	301,71	0,0014106	0,02103	47,55	1354,7	2746	1391,5	3,271	5,691
89	302,52	0,001414	0,02075	48,19	1359,2	2744	1385,4	3,279	5,685
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,87	5,678
91	304,11	0,0014208	0,02021	49,48	1368,2	2741	1373,2	3,294	5,672
92	304,9	0,0014242	0,01995	50,13	1372,7	2740	1367	3,301	5,665
93	305,67	0,0014276	0,01969	50,79	1377,1	2738	1360,9	3,309	5,659
94	306,45	0,001431	0,01944	51,45	1381,5	2736	1354,7	3,316	5,653
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
96	307,98	0,001438	0,01895	52,77	1390,2	2732	1342,1	3,331	5,64
97	308,74	0,0014415	0,01871	53,44	1394,5	2730	1335,8	3,338	5,634

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
98	309,49	0,001445	0,01848	54,11	1398,9	2728	1329,5	3,346	5,628
99	310,23	0,0014486	0,01825	54,79	1403,3	2726	1323,2	3,353	5,621
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317	3,36	5,615
102	312,42	0,0014592	0,01759	56,85	1416,4	2721	1304,6	3,374	5,602
104	313,86	0,0014664	0,01716	58,27	1425	2717	1292,3	3,388	5,59
106	315,28	0,0014736	0,01675	59,7	1433,5	2713	1280	3,402	5,578
108	316,67	0,0014808	0,01636	61,13	1441,9	2709	1267,3	3,416	5,565
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,43	5,553
112	319,39	0,001496	0,01561	64,05	1458,4	2701	1243	3,443	5,541
114	320,73	0,001503	0,01526	65,54	1466,6	2697	1230,6	3,457	5,528
116	322,05	0,001511	0,01491	67,06	1474,8	2693	1218,3	3,47	5,516
118	323,35	0,001519	0,01458	68,59	1483	2689	1205,9	3,483	5,504
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
122	325,9	0,001535	0,01395	71,7	1499,2	2680	1181	3,509	5,48
124	327,15	0,001543	0,01364	73,3	1507,3	2676	1168,5	3,522	5,468
126	328,39	0,001551	0,01334	74,94	1515,4	2671	1156	3,535	5,456
128	329,61	0,001559	0,01305	76,61	1523,5	2667	1143,4	3,548	5,444
130	330,81	0,001567	0,01277	78,3	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
132	332	0,001576	0,0125	80	1539,5	2658	1118,2	3,573	5,42
134	333,18	0,001585	0,01224	81,72	1547,3	2653	1105,5	3,586	5,408
136	334,34	0,001594	0,01198	83,47	1555,1	2648	1092,7	3,598	5,396
138	335,49	0,001602	0,01173	85,25	1562,9	2643	1079,9	3,61	5,384
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
142	337,75	0,00162	0,01125	88,89	1578,7	2633	1053,8	3,636	5,36
144	338,86	0,001629	0,01101	90,83	1586,6	2628	1040,7	3,648	5,348
146	339,96	0,001638	0,01078	92,76	1594,5	2622	1027,6	3,66	5,336
148	341,04	0,001648	0,01056	94,69	1602	2617	1014,5	3,672	5,323
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,31
152	343,18	0,001668	0,01014	98,62	1618	2606	987,5	3,697	5,297
154	344,23	0,001678	0,009928	100,72	1626	2600	973,8	3,709	5,285
156	345,27	0,001688	0,00972	102,9	1634	2594	960	3,721	5,273
158	346,3	0,001699	0,009517	105,1	1642	2588	946,1	3,733	5,26
160	347,32	0,00171	0,009318	107,3	1650	2582	932	3,746	5,247
162	348,33	0,001721	0,009124	109,6	1658	2576	917,7	3,758	5,233
164	349,32	0,001732	0,008934	111,9	1666	2569	903,2	3,77	5,219
166	350,31	0,001744	0,008747	114,3	1674	2562	888,4	3,783	5,205
168	351,29	0,001756	0,008563	116,8	1682	2555	873,4	3,795	5,191
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
172	353,21	0,001781	0,008203	121,9	1698	2541	843	3,82	5,163
174	354,17	0,001794	0,008025	124,6	1707	2534	827,4	3,832	5,149
176	355,11	0,001808	0,007848	127,4	1715	2526	811,4	3,845	5,135
178	356,04	0,001822	0,007674	130,3	1723	2518	795	3,858	5,121
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
182	357,87	0,001853	0,007336	136,3	1741	2502	761,2	3,884	5,092
184	358,78	0,00187	0,007169	139,5	1749	2493	743,9	3,898	5,076
186	359,67	0,001887	0,007003	142,8	1758	2484	726,4	3,911	5,06
188	360,56	0,001904	0,00684	146,2	1767	2475	708,5	3,925	5,044

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
192	362,31	0,00194	0,00652	153,4	1785	2456	671	3,952	5,009
194	363,17	0,001961	0,00636	157,3	1795	2446	651	3,967	4,99
196	364,02	0,001985	0,00619	161,6	1805	2435	630	3,982	4,97
198	364,87	0,00201	0,00602	166,1	1816	2423	607	3,998	4,949
200	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
202	366,54	0,00207	0,00568	176	1838	2397	559	4,032	4,906
204	367,37	0,0021	0,00551	181,4	1849	2383	534	4,049	4,883
206	368,18	0,00213	0,00534	187,2	1861	2369	508	4,067	4,858
208	368,99	0,00217	0,00516	193,6	1874	2353	479	4,087	4,832
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
212	370,58	0,00226	0,0048	208,5	1903	2316	413	4,131	4,771
214	371,4	0,00232	0,0046	217,4	1920	2294	374	4,157	4,734
216	372,2	0,00239	0,00436	229,3	1940	2269	329	4,188	4,692
218	372,9	0,00249	0,00402	248,7	1965	2233	268	4,223	4,645
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Додаток В

Таблиця В.1 – Теплофізичні властивості повітря при P = 760 мм рт. ст.

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг · К)	$\lambda$ , 10 <sup>-2</sup> Вт/(м·К)	$a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	$\mu$ , 10 <sup>-6</sup> , Н · с/м <sup>2</sup>	$\nu$ , 10 <sup>-6</sup> , м <sup>2</sup> /с	Pr
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688

*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
до самостійної роботи студентів з дисципліни  
«Тепломасообмін і гідродинаміка  
багатокомпонентних середовищ»  
для студентів денної та заочної форм навчання  
спеціальності – «Теплоенергетика»

Редактор С. Сідак

Укладачі: Степанова Наталія Дмитрівна

Ткаченко Станіслав Йосипович

Оригінал-макет підготовлено Н. Степановою

Підписано до друку 09.01.2018 р.  
Формат 29,7x42¼ . Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 3,00. Зам. № 2018-022.  
Наклад 40 (1-й запуск 1–20) пр.

Видавець та виготовлювач  
інформаційний редакційно-видавничий центр.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 65-18-06.  
**pres.vntu.edu.ua;**  
*E-mail:* [kivc.vntu@gmail.com](mailto:kivc.vntu@gmail.com).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.