

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

**ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ І МАШИНИ ГАЛУЗІ – 1.
ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункової роботи студентів з кредитного модуля
«Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси»
для студентів напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування»,
6.050502 «Інженерна механіка»

Рекомендовано Вченою радою інженерно-хімічного факультету

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

Процеси, апарати машини галузі - 1. Теплові процеси:

Метод. вказівки до викон. розрахункової роботи студентів з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для студ. напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» / Уклад.: В.В. Малиновський, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2016.– 33 с.

*Гриф надано Вченою радою ІХФ
(Протокол № 2 від 28.03. 2016 р.)*

Навчальне видання

ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ І МАШИНИ ГАЛУЗІ – 1. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи студентів з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для студентів напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка»

Авторська редакція

Укладачі:

В.В. Малиновський, к.т.н., доц.
І.О. Казак, к.п.н.

Відповідальний редактор

Д.Е. Сідоров, к.т.н., доц.

Рецензент:

А.Р. Степанюк, к.т.н., доц.

ВСТУП

Кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» входить до вибіркової частини навчального плану бакалаврів за напрямами підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» і відноситься до дисциплін самостійного вибору навчального закладу.

Згідно освітньо-кваліфікаційної характеристики бакалаврів за напрямами підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» формує здатність робити обґрунтований вибір обладнання для реалізації теплообмінних процесів та виконувати їх параметричні розрахунки.

Кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» базується на знанні студентом математики, інформатики, нарисної геометрії, хімії, фізики, теоретичні основи теплотехніки та інших наук, таких як: «Вища математика» (розділи: інтегральне та диференційне обчислення), «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» (розділ: робота з електронними таблицями), «Фізика» (розділ: механіка), «Хімія» (розділ: властивості речовин), а також дисциплін «Опір матеріалів» і «Механіка твердого деформованого тіла». Він є базовим для вивчення наступних кредитних модулів: «Процеси, апарати і машини галузі - 2. Механічні процеси», «Процеси, апарати і машини галузі - 3. Гідромеханічні процеси» та інших дисциплін «Пакувальне обладнання», «Технологія машинобудування». Матеріал кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» викладається на 3-му курсі навчання бакалаврів за напрямами підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка». Загальний навчальний час, який потрібний для вивчення кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси», складає (разом з СРС) 216 год. (6 кредитів) згідно з робочим навчальним планом.

Метою кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» є оволодіння студентами не лише теорією, а і методами розрахунків основних теплових процесів, машин і апаратів, та використання одержаних знань при вивченні спеціальних дисциплін, а також у фаховій діяльності.

Метою розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для бакалаврів за напрямами підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» є оволодіння студентами не лише теорією, а здобуття навичок виконувати розрахунки за темами «Конденсація» і «Теплопередача», які винесені на розрахункову роботу студентів з даного кредитного модуля.

1. Загальні положення щодо організації розрахункової роботи студентів

Розрахункова робота студентів з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» передбачається робочим навчальним планом для бакалаврів за напрямами підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» на 3-му курсі у 6-му семестрі та регламентується Положенням про організацію навчального процесу в вищих навчальних закладах України, затвердженим наказом Міністерства освіти України № 161 від 2 червня 1993 року та Положенням про систему нарахування балів за кредитно-модульною системою кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси».

У методичних вказівках представлені методики розрахунків за такими видами теплообміну, як конденсація і теплопередача, які не виносяться на закріплення на аудиторних заняттях, а закріплюються самостійно студентами при виконанні розрахункової роботи студентів з кредитного модуля «Процеси,

апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси». На це відводиться певна кількість годин самостійної роботи від загальної кількості годин на вивчення даного кредитного модуля згідно його робочої навчальної програми. Це завдання корисно для вивчення майбутніми інженерами-механіками за напрямками підготовки 6.050503 «Машинобудування» і 6.050502 «Інженерна механіка» в зв'язку з тим, що дуже часто застосовується у реальних умовах роботи процесів і апаратів хімічної технології та обладнання хімічних і пакувальних виробництв, як приклад розв'язання характерних задач при заданих умовах.

Після вивчення теоретичного матеріалу на лекційних заняттях тем «Конденсація», «Теплопередача» викладач видає студентам завдання для виконання розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси». При видачі завдання на розрахункову роботу для студентів передбачена багатоваріантна система умов завдання. Варіанти відповідають порядковому номеру n студента у списку групи та додатковим даним за варіантами згідно таблиць 4.1 і 4.2 даних методичних вказівок. В додатках цих методичних вказівок наведені необхідні довідникові дані у таблицях, які використовуються при розрахунках завдання даної розрахункової роботи.

Оформлюється розрахункова робота на листах формату А4 за методиками розрахунків, які наведені у цих методичних вказівках. Зразок титульного листа представлений у додатку 5 методичних вказівок.

Виконане завдання розрахункової роботи здається студентом для перевірки викладачу в кінці вивчення кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» та оцінюється згідно рейтингової системи оцінювання даного кредитного модуля.

Успішне виконання завдання даної розрахункової роботи можливе за умови наявності у студентів певних знань з теоретичних відомостей за темами «Конденсація» і «Теплопередача», методик розрахунків цих теплових процесів

та навичок виконувати їх, а також уміння проводити аналіз отриманих результатів розрахунків.

2. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

Процес ламінарного стікання плівки конденсату для циліндричної поверхні, яка розміщена горизонтально, критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = 0,72 (Ga \text{ Pr } \Pi)^{0,25} \quad (2.1)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$ - критерій Нусельта;

α - інтенсивність тепловіддачі при конденсації, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

h - висота поверхні, м;

λ - коефіцієнт теплопровідності плівки конденсату, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$;

$Ga = \frac{gh^3}{\nu^2}$ - критерій Галілея;

ν - кінематична в'язкість плівки конденсату, $\frac{м^2}{с}$

Pr - критерій Прандтля, який визначається при середній температурі плівки конденсату $t = 0,5 \cdot (t_n + t_{cm})$,

де t_n - температура пари, $^\circ C$; t_{cm} - температура стінки, $^\circ C$;

$\Pi = \frac{r}{C\Delta t}$ - критерій фазового переходу;

r - прихована теплота пароутворення, яка визначається при температурі пари t_n , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

C - питома теплоємність пари, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ\text{C}$.

Перепад температур між парою і стінкою (трубою) за формулою (2.3):

$$\Delta t = t_n - t_{cm}, ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

Визначальним розміром для циліндричної поверхні, яка розміщена горизонтально в критеріях є зовнішній діаметр циліндричного тіла d .

Продуктивність апарата по конденсату (або маса сконденсованої пари) за формулою (2.4):

$$G = \frac{Q}{r}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (2.4)$$

де $Q = \alpha F \Delta t$ – потужність теплового потоку, кВт ;

r – прихована теплота пароутворення, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

F – площа поверхні труби, м^2 ;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ\text{C}$.

3. Методика виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

Задача №1

Середня температура плівки конденсату сухої насиченої пари $t_c = 90 + n, ^\circ\text{C}$, а температура поверхні труби $t_{ct} = 50 + n, ^\circ\text{C}$. Визначити тиск пари

в апараті і масу пари, яка сконденсується за годину на горизонтальній трубі діаметром $d = (n + a_1)$, мм і довжиною $L = (0,5 \cdot n + a_2)$, м, де n – порядковий номер студента за списком академічної групи.

Розглянемо методику виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»:

1. Температуру плівки конденсату сухої насиченої пари розраховують за формулою (3.5):

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot (t_n + t_{cm}) \quad (3.5)$$

де t_n – температура пари в апараті, $^{\circ}\text{C}$;

t_{cm} – температура поверхні стінки (труби), $^{\circ}\text{C}$;

t_c – температура плівки конденсату сухої насиченої пари, $^{\circ}\text{C}$.

З формули (2.1) знаходимо температуру пари в апараті за формулою (3.6):

$$t_n = 2 \cdot t_c - t_{cm} \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (3.6)$$

2. Тиск в апараті P_n і приховану теплоту пароутворення r_n визначають з додатку 4 таблиці 4 за температурою пари в апараті t_n :

$$P_n = f(t_n), \text{ Па};$$

$$r_n = f(t_n), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3. Перепад температур між парою і стінкою (трубою) визначають за формулою (3.7):

$$\Delta t = t_n - t_{cm} \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (3.7)$$

4. Визначимо фізичні властивості плівки конденсату λ , C , ν , Pr за температурою плівки конденсату сухої насиченої пари t_c визначають з додатку 2 таблиці 2.

5. Критерій Галілея визначають за формулою (3.8):

$$Ga = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2}, \quad (3.8)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\frac{m}{c^2}$; ($g = 9,8 \frac{m}{c^2}$)

ℓ – визначальний розмір, m , (для горизонтальної труби визначальним розміром є зовнішній діаметр труби $\ell = d$);

ν – кінематична в'язкість, $\frac{m^2}{c}$.

6. Критерій фазового переходу визначають за формулою (3.9):

$$Pi = \frac{r}{C \cdot \Delta t} \quad (3.9)$$

де r – прихована теплота пароутворення, $\frac{kJ}{kg}$;

C – теплоємність плівки конденсату, $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ C$.

7. Критерій Нусельта визначають за формулою (3.10):

$$Nu = 0,72 (Ga Pr Pi)^{0,25} \quad (3.10)$$

8. Коефіцієнт тепловіддачі визначають за формулою (3.11):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (3.11)$$

9. Площу поверхні труби визначають за формулою (3.12):

$$F = \pi \cdot d \cdot L , \quad (3.12)$$

де F – площа поверхні труби, м^2 ; $\pi=3,14$

d – зовнішній діаметр горизонтальної труби в апараті, м ;

L – довжина горизонтальної труби, м .

10. Потужність теплового потоку визначають за формулою (3.13):

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t , \quad (3.13)$$

де Q - потужність теплового потоку між парою і трубою, яка передається тепловіддачею, Вт;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

F – площа поверхні теплообміну, м^2 ;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ\text{C}$.

11. Масу сконденсованої пари визначають за формулою (3.14):

$$G = \frac{Q}{r} , \quad (3.14)$$

де G – маса сконденсованої пари, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

Q - потужність теплового потоку між парою і трубою, яка передається тепловіддачею, Вт;

r – прихована теплота пароутворення, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Розглянемо приклад виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація».

Дано:

$$t_c = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{ct} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$d = 80 \text{ мм}$$

$$L = 1,5 \text{ м}$$

$$P_n - ? \quad G - ?$$

Рішення:

1. Температура плівки конденсату сухої насиченої пари:

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot (t_n + t_{cm}) , \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Звідси знаходимо температуру пари в апараті

$$t_n = 2 \cdot t_c - t_{cm} = 2 \cdot 90 - 50 = 130 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Тиск в апараті P_n і приховану теплоту пароутворення r_n визначаємо з додатку таблиці Д4 за температурою пари в апараті t_i :

$$P_n = f(t_n) = 2,7 \cdot 10^5, \text{ Па};$$

$$r_n = f(t_n) = 2174,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} .$$

3. Перепад температур між парою і трубою

$$\Delta t = t_n - t_{cm} = 130 - 50 = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4. Визначимо фізичні властивості плівки конденсату λ , C , ν , Pr за температурою плівки конденсату сухої насиченої пари t_c визначаємо з додатку таблиці Д2.

$$\lambda = 0,68 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}, \quad C = 4,22 \frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}, \quad \nu = 0,326 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}, \quad Pr = 1,95$$

5. Критерій Галілея

$$Ga = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,08^3}{(0,326 \cdot 10^{-6})^2} = 4,72 \cdot 10^{10}$$

де ℓ – визначальний розмір для горизонтальної труби визначальним розміром є зовнішній діаметр труби $\ell = d = 0,08 \text{ м}$.

6. Критерій фазового переходу

$$Pi = \frac{r}{C \cdot \Delta t} = \frac{2174,3}{4,22 \cdot 80} = 6,44$$

7. Критерій Нусельта

$$Nu = 0,72 (Ga \cdot Pr \cdot Pi)^{0,25} = 0,72 \cdot (4,72 \cdot 10^{10} \cdot 1,95 \cdot 6,44)^{0,25} = 631$$

8. Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{631 \cdot 0,68}{0,08} = 5364 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

9. Площу поверхні труби

$$F = \pi \cdot d \cdot L = 3,14 \cdot 0,08 \cdot 1,5 = 0,3768 \text{ м}^2$$

10. Потужність теплового потоку

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t = 5364 \cdot 0,3768 \cdot 80 = 161692 \text{ Вт} = 161,7 \text{ кВт}$$

11. Маса сконденсованої пари

$$G = \frac{Q}{r} = \frac{161,7}{2174,3} = 0,0743 \frac{кг}{с} = 268 \frac{кг}{год}$$

4. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

Потужність теплового потоку теплопередачею через стінку визначається за формулою (4.1):

$$Q = K \cdot (t_{p_1} - t_{p_2}) \cdot F, \quad (4.1)$$

де Q - потужність теплового потоку через стінку, Вт;

K – коефіцієнт теплопередачі на 1 м² площі теплообміну, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

F – площа поверхні теплообміну, м² ;

t_{p_1}, t_{p_2} - середні температури рідини з обох боків стінки, $^\circ C$.

Питомий тепловий потік, Вт/м:

$$q = K \cdot (t_{p_1} - t_{p_2}) \quad (4.2)$$

В рівнянні (4.2) середній перепад температур при прямотечії (протитечії) рідин

$$t_{p_1} - t_{p_2} = \Delta t_c = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_m}}, \quad (4.3)$$

де Δt_δ - більший перепад температур теплоносіїв з обох боків стінки, $^\circ C$;

Δt_m - менший перепад температур, $^\circ C$.

Для циліндричної стінки лінійний коефіцієнт теплопередачі (на 1 м довжини каналу), $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_1^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}}, \quad (4.4)$$

де $d_1, d_2, \dots, d_n, d_{n+1}$ - діаметри шарів стінки, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ - коефіцієнти теплопровідності матеріалів, з яких

виготовлені шари стінки, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$.

Потужність теплового потоку, яка передається теплопередачею, для циліндричної стінки, Вт

$$Q_l = q_l \cdot l = K \cdot l \cdot \Delta t_c \quad (4.5)$$

5. Методика виконання розрахунку задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

Задача №2

В горизонтальному теплообмінному апараті, який складається з $N = (n + a_1)$ труб з матеріалу a_2 , розміщених в кожусі діаметром $D = (0,1 \cdot n + 0,1)$, і підігрівається вода. Гаряча вода, яка тече в трубах діаметрами $d_1/d_2 = a_3/a_4$, охолоджується від температури $t'_1 = (n + a_5)^\circ C$ до $t''_1 = (n + a_6)^\circ C$. Холодна вода, яка тече вздовж трубок в кожусі, нагрівається від температури $t'_2 = (n + a_7)^\circ C$ до $t''_2 = (n + a_8)^\circ C$. Потужність теплового потоку через поверхню нагрівання $Q = 10 \cdot n + a_9, кВт$.

Визначити довжину кожуха l теплообмінного апарату для проточесії і протитечії рідин для чистих труб, та труб з шаром накипу товщиною

$\delta_n = a_{10}, \text{мм}$ та коефіцієнтом теплопровідності накипу $\lambda_n = a_{11}, \text{Вт/м} \cdot \text{град}$.

Вибрати найкращі умови теплопередачі.

Побудувати графіки для середнього температурного напору у теплообміннику за умов протічії і протитечії руху рідини у трубках без шару накипу і з урахуванням товщини шару накипу в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

Розглянемо методику виконання задачі №2 за темою «Теплопередача» розрахункової роботи студентів:

1. Визначальна температура:

гарячої води
$$t_z = \frac{t_1' + t_1''}{2}, ^\circ \text{C} \quad (5.1)$$

холодної води
$$t_x = \frac{t_2' + t_2''}{2}, ^\circ \text{C} \quad (5.2)$$

2. Теплофізичні властивості за додатком у таблиці Д2 при визначальній температурі гарячої води t_z : $C_z, \rho_z, \nu_z, \lambda_z, \text{Pr}_z$; холодної води при визначальній температурі холодної води t_x : $C_x, \rho_x, \nu_x, \lambda_x, \text{Pr}_x$.

3. Витрати гарячої води G_z та холодної води G_x знаходимо з рівняння (5.3) за формулами (5.4) та (5.5):

$$Q = C \cdot G \cdot \Delta t, \quad (5.3)$$

де C – питома теплоємність рідини, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$;

G – витрати рідини, кг/с ;

Δt - перепад температур на вході в апарат і виході з нього.

Тоді:

$$G_z = \frac{Q}{C_z \cdot (t_1' - t_1'')}, \text{ кг/с} \quad (5.4)$$

$$G_x = \frac{Q}{C_x \cdot (t_2'' - t_2')}, \text{ кг/с} \quad (5.5)$$

Значення C_z і C_x взяти при середніх температурах t_z і t_x відповідно.

4. Визначальний розмір для гарячої води – це d_1 без накипу з умови задачі №2, м;

для холодної води – еквівалентний діаметр міжтрубного простору:

$$d_{\text{екв}} = \frac{D^2 - N \cdot d_2^2}{D + N \cdot d_2}, \text{ м} \quad (5.6)$$

5. Швидкість гарячої та холодної води визначають за формулами (5.7) та (5.8):

$$V_z = \frac{4 \cdot G_z}{\pi \cdot N \cdot \rho_z \cdot d_1^2}, \text{ м/с} \quad (5.7)$$

$$V_x = \frac{4 \cdot G_x}{\pi \cdot \rho_x \cdot d_{\text{екв}}^2}, \text{ м/с} \quad (5.8)$$

6. Критерій Рейнольдса для гарячої та холодної води визначають за формулами (5.9) та (5.10):

$$\text{Re}_z = \frac{V_z \cdot d_1}{\nu_z} \quad (5.9)$$

$$Re_x = \frac{V_x \cdot d_{екв}}{\nu_x} \quad (5.10)$$

7. Режим руху рідини визначають за формулами (5.11) або (5.12) або (5.13) за критерієм Рейнольдса для гарячої та холодної води окремо.

Якщо $Re < 3000$, то режим ламінарний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.11):

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot Pr_c^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.11)$$

Якщо $3000 < Re < 10000$, то режим перехідний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.12):

$$Nu = 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,3} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.12)$$

Якщо $Re > 10000$, то режим турбулентний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.13):

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.13)$$

Відношенням ($Pr_c / Pr_p = 1$) можна знехтувати для визначення критерію Нусельта, де Pr_c приймається за додатком 1 у таблиці 1 .

8. Коефіцієнти тепловіддачі гарячої та холодної води визначають за формулами (5.14) та (5.15):

$$\alpha_z = \frac{Nu_z \cdot \lambda_z}{d_1}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (5.14)$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{екв}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (5.15)$$

9. Для одношарової циліндричної стінки товщиною $(d_1 - d_2)/2$ лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l визначають за формулою (5.16):

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}}, \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \quad (5.16)$$

10. Побудувати графіки для розрахунку середнього температурного напору для протіччя і протитечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

11. Середній температурний напір для протіччя визначають за формулою (5.17):

$$\Delta t_{np} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}}, ^\circ C \quad (5.17)$$

а для протитечії визначають за формулою (5.18):

$$\Delta t_{прот} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}, ^\circ C \quad (5.18)$$

12. Довжина корпусу теплообмінника:

$$l = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{np(npom)}}, \text{ м} \quad (5.19)$$

13. Для врахування впливу товщини шару накипу в трубі з гарячою водою в формулах (5.7), (5.9), (5.14), (5.16) замість d_1 потрібно використовувати $(d_1 - 2\delta_n)$, а лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l розраховується за формулою (5.20) з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$K_l^H = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_z \cdot (d_1 - 2\delta_n)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \ln \frac{d_1 + 2\delta_n}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}}, \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \quad (5.20)$$

14. Проаналізувати проведені розрахунки процесу теплопередачі у теплообмінному апараті та зробити висновки про кращий варіант теплообмінника з точки зору довжини труб коли існує протитечія і відсутній накип в трубах.

Розглянемо приклад виконання розрахунку задачі №2 за темою «Теплопередача» розрахункової роботи студентів.

Дано:

$n=4$ – варіант завдання у прикладі

$N=n+a_1=4+54=58$

a_2 – бронза

$D=0,1 \cdot n + 0,1 = 0,1 \cdot 4 + 0,1 = 0,5 \text{ м}$

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{15_{\text{мм}}}{17_{\text{мм}}} = \frac{0,015_{\text{м}}}{0,017_{\text{м}}}$$

$$t_1' = (n+a_5)=(4+115)=119 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_1'' = (n+a_6)=(4+85)=89 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_2' = (n+a_7)=(4+15)=19 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_2'' = (n+a_8)=(4+32)=36 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$Q=(10 \cdot n+a_9)=10 \cdot 4+650=690 \text{ кВт}$$

$$\delta_{\text{н}}=a_{10}=n \cdot a_{10}=4 \cdot 0,2=0,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\text{н}}=a_{11}=1,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$l_{\text{пр}} - ? \quad l_{\text{прот}} - ? \quad l_{\text{пр}}^{\text{н}} - ? \quad l_{\text{прот}}^{\text{н}} - ?$$

Рішення:

1. Визначальна температура:

$$\text{гарячої води} \quad t_{\bar{a}} = \frac{t_1' + t_1''}{2} = \frac{119 + 89}{2} = 104 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$\text{холодної води} \quad t_{\bar{o}} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{19 + 36}{2} = 28 \text{ } ^\circ \text{C}$$

2. Теплофізичні властивості за додатком 2 у таблиці 2:

- при визначальній температурі гарячої води $t_{\bar{a}}$:

$$C_{\bar{a}}=4,235 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}, \rho_{\bar{a}}=954 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \nu_{\bar{a}}=0,295 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda_{\bar{a}}=0,684 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}, \text{Pr}_{\bar{a}}=1,7 ;$$

- при визначальній температурі холодної води $t_{\bar{o}}$:

$$C_{\bar{o}}=4,170 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}, \rho_{\bar{o}}=997 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \nu_{\bar{o}}=0,295 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda_{\bar{o}}=0,612 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}, \text{Pr}_{\bar{o}}=6.$$

3. Знаходимо витрати гарячої води $G_{\bar{a}}$ та холодної води $G_{\bar{o}}$:

$$G_{\bar{e}} = \frac{Q}{C_{\bar{e}} \cdot (t_1' - t_1'')} = \frac{690}{4,235 \cdot (119 - 89)} = 5,43 \text{ кг/с}$$

$$G_x = \frac{Q}{C_x \cdot (t_2'' - t_2')} = \frac{690}{4,170 \cdot (35 - 19)} = 9,73 \text{ кг/с}$$

4. Визначальний розмір для гарячої води – це d_1 без накипу, м, а для холодної води – це еквівалентний діаметр міжтрубного простору:

$$d_{\text{екв}} = \frac{D^2 - N \cdot d_2^2}{D + N \cdot d_2} = \frac{0,5^2 - 58 \cdot 0,017^2}{0,5 + 58 \cdot 0,017} = 0,1676 \text{ м}$$

5. Визначаємо швидкість гарячої та холодної води:

$$V_{\bar{e}} = \frac{4 \cdot G_{\bar{e}}}{\pi \cdot N \cdot \rho_{\bar{e}} \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 5,43}{3,14 \cdot 58 \cdot 954 \cdot 0,015^2} = 0,555 \text{ м/с}$$

$$V_x = \frac{4 \cdot G_x}{\pi \cdot \rho_x \cdot d_{\text{екв}}^2} = \frac{4 \cdot 9,73}{3,14 \cdot 997 \cdot 0,1676^2} = 0,443 \text{ м/с}$$

6. Визначаємо Критерій Рейнольдса для гарячої та холодної води:

$$\text{Re}_{\bar{e}} = \frac{V_{\bar{e}} \cdot d_1}{\nu_{\bar{e}}} = \frac{0,555 \cdot 0,015}{0,285 \cdot 10^{-6}} = 29200$$

$$\text{Re}_x = \frac{V_x \cdot d_{\text{екв}}}{\nu_x} = \frac{0,443 \cdot 0,1676}{0,9 \cdot 10^{-6}} = 82500$$

7. Визначаємо режим руху рідини за критерієм Рейнольдса для гарячої та холодної води окремо.

Якщо $\text{Re} > 10000$, то режим турбулентний і критерій Нусельта розраховують за виразом:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25},$$

де Pr_c - критерій Прандтля стінки приймається за додатком 1 у таблиці 1.

У виразі для розрахунку критерію Нусельта відношенням (Pr_c/Pr_p) можна знехтувати і прийняти його рівним одиниці $(Pr_c/Pr_p = 1)$.

$$Nu_z = 0,021 \cdot Re_z^{0,8} \cdot Pr_z^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot 29200^{0,8} \cdot 1,7^{0,43} = 98,5$$

$$Nu_x = 0,021 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr_x^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot 82500^{0,8} \cdot 6^{0,43} = 389$$

8. Визначаємо коефіцієнти тепловіддачі гарячої та холодної води:

$$\alpha_z = \frac{Nu_z \cdot \lambda_z}{d_1} = \frac{98,5 \cdot 0,684}{0,015} = 4492 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{екв}} = \frac{389 \cdot 0,612}{0,1676} = 1420 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

9. Визначаємо для одношарової циліндричної стінки товщиною $(d_1 - d_2)/2$ лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l :

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_z \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}} = \frac{3,14}{\frac{1}{4492 \cdot 0,015} + \frac{1}{2 \cdot 42} \cdot \ln \frac{0,017}{0,015} + \frac{1}{1420 \cdot 0,1676}} = 15302 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$$

10. Побудуємо графіки для розрахунків середнього температурного напору для протічії і протитечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l (рис.5.1 і рис.5.2).

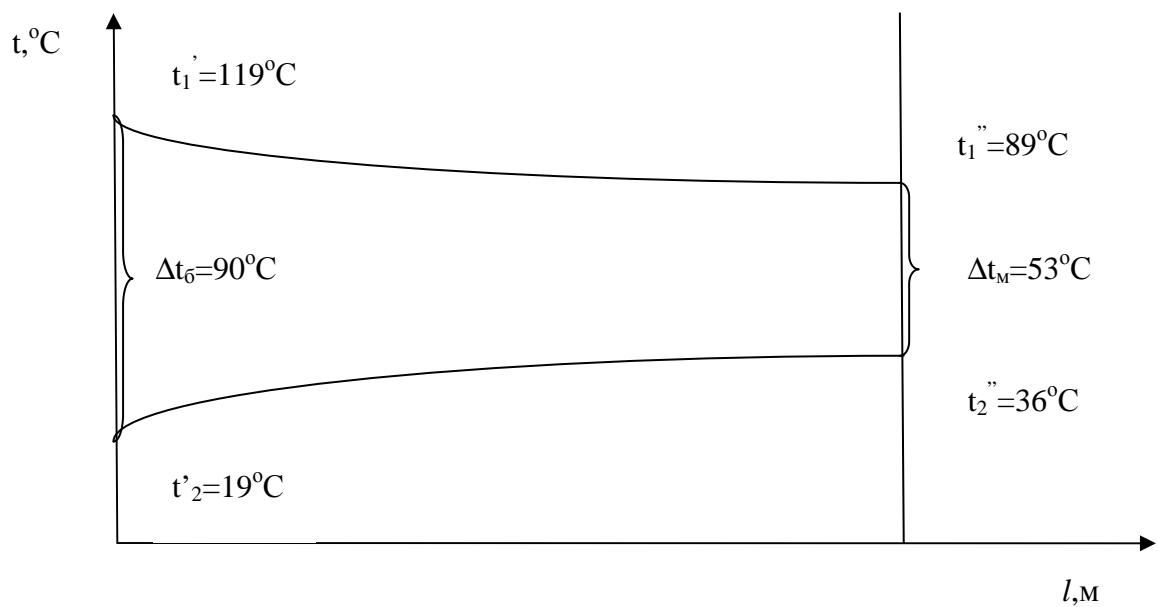


Рис. 5.1 - Графік для розрахунку середнього температурного напору для протічії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

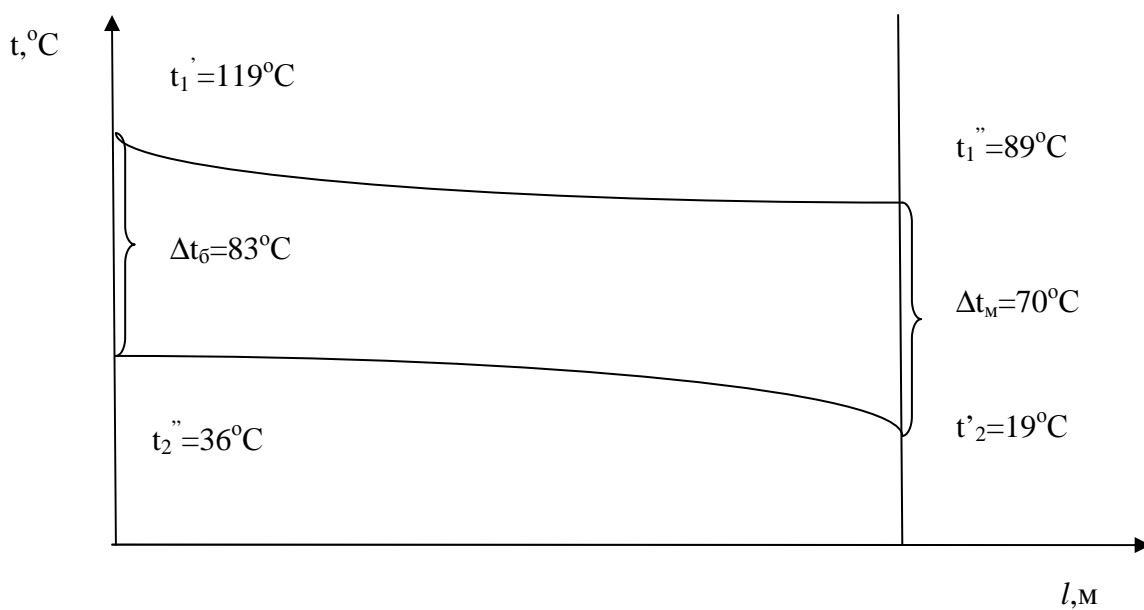


Рис. 5.2 - Графік для розрахунку середнього температурного напору для протічії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

11. Визначаємо середній температурний напір:

для прямотечії:

$$\Delta t_{np} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}} = \frac{(119 - 19) - (89 - 36)}{\ln \frac{(119 - 19)}{(89 - 36)}} = \frac{47}{0,635} = 74^{\circ} \text{C}$$

для протитечії:

$$\Delta t_{\text{прот}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} = \frac{(119 - 36) - (89 - 19)}{\ln \frac{(119 - 36)}{(89 - 19)}} = 76^{\circ} \text{C}$$

12. Визначаємо довжину корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії:

$$l_{np} = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{np}} = \frac{690 \cdot 10^3}{153,02 \cdot 74} = 60,94 \text{ м}$$

$$l_{\text{прот}} = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{\text{прот}}} = \frac{690 \cdot 10^3}{153,02 \cdot 76} = 59,33 \text{ м}$$

13. Визначаємо лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l розраховується з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$K_l^H = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_c \cdot (d_1 - 2\delta_n)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \ln \frac{d_1 + 2\delta_n}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{\text{екв}}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Знайдемо у додатку 3 за таблицею 3 λ_{a2} для матеріалу a_2 - бронза, з якого виготовлені труби теплообмінного апарату за умовою прикладу задачі №2. Обираємо за додатком 3 з таблиці 3 для бронзи коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_{a2} = 42 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

$$K_l^H = \frac{3,14}{\frac{1}{4492(0,015-2 \cdot 0,0008)} + \frac{1}{2 \cdot 42} \cdot \ln \frac{0,017}{0,015} + \frac{1}{2 \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{(0,015+2 \cdot 0,0008)}{0,015} + \frac{1}{14200,1676}} = 58,17 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$$

Визначаємо довжину корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$l_{np}^H = \frac{Q}{K_l^H \cdot \Delta t_{np}} = \frac{690 \cdot 10^3}{58,17 \cdot 74} = 160,29 м$$

$$l_{прот}^H = \frac{Q}{K_l^H \cdot \Delta t_{прот}} = \frac{690 \cdot 10^3}{58,17 \cdot 76} = 156,08 м$$

14. За результатами розрахунків довжини корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії без накипу та з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою можна зробити такі висновки, що найвигідніші умови теплопередачі при протитечії без накипу, тому що коефіцієнт теплопередачі значно більший ніж з шаром накипу

$K_l = 153,02 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} > K_l^H = 58,17 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ і довжина трубок апарату при цьому найменша – $l_{прот} = 59,33 м$.

6. Варіанти завдань до розрахункової роботи студентів

Для кожної групи студентів для напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» викладачем з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі -1. Теплові процеси» для виконання розрахункової роботи за темами «Конденсація» (задача №1) і «Теплопередача» (задачі №2) після вивчення даних тем на лекціях видається індивідуальний варіант для виконання задачі № 1 за таблицею 6.1 і задачі № 2 за таблицею 6.2.

Таблиця 6.1 – Варіанти до задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

Варі- ант	a_1	a_2
1	90	0,1
2	100	0,2
3	110	0,3
4	120	0,4
5	130	0,5

Таблиця 6.2 – Варіанти до задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

Варі- ант	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
1	48	сталь	10	12	100	70	12	26	500	0,05	2,2
2	50	мідь	12	14	105	75	13	28	550	0,10	2,0
3	52	латунь	14	16	110	80	14	30	600	0,15	1,8
4	54	бронза	15	17	115	85	15	32	650	0,20	1,6
5	56	алюмін ій	16	19	120	90	16	34	700	0,25	1,4

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця 1 - Фізичні властивості сухого повітря ($B = 760$ мм рт. ст.
 $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{K}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{K}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,8	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	17,6	14,16	0,706
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,9	16	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,090	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,9	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,1	0,69
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	24,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,3	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,745	1,026	3,93	51,4	26	34,85	0,68
250	0,674	1,038	4,27	61	27,4	40,61	0,677

Таблиця 2 - Фізичні властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho,$ кг/м ³	$i,$ кДж/кг	$C_p,$ кДж/кг \cdot К	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/м \cdot К	$\alpha \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па \cdot с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$ Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,02		57,4	13,7	1306	1,306	0,7	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	54,8	15,7	649,4	0,556	4,49	675,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293	4,187	56,8	16,3	406,1	0,415	5,7	643,5	2,55
80	1,013	971,8	336	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377	4,208	68	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,22	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951	461,4	4,233	68,5	17	259	0,272	8,08	569	1,6
120	1,98	943,1	503,7	4,25	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,7	934,8	545,4	4,256	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,26
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,03	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,8	466	1,1
170	7,92	897,3	719,3	4,38	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	885,9	753,3	4,417	67,4	17,2	153	0,173	11,9	422,8	1
190	12,55	876	807,8	4,459	67	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863	862,5	4,505	56,3	17	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93

Таблиця 3 - Густина, теплопровідність і теплоємність будівельних теплоізоляційних та інших матеріалів

Матеріал	ρ , кг/м ³	t, °C	λ , Вт/м °K	C, кДж/кг °K
1	2	3	4	5
Сталь вуглецева	7800	100 ... 600	54,4 ... 33,5	-
Сталь нержавіюча	7800	100 ... 90	15,5 ... 22	-
Мідь	8800	0 ... 600	393 ... 354	0,393
Латунь	8600	0 ... 600	100 ... 151	-
Алюміній	2700	0 ... 600	202 ... 422	-
Бронза	8000	20	42	-
Чавун	7220	20	65	-
Залізо котлове	7800	0 ... 600	63 ... 31	-

Таблиця 4 - Фізичні властивості водяної пари на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, \text{К}$	$r, \text{кДж/кг}$	$C_p, \text{кДж/кг}^\circ\text{К}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м}^\circ\text{К}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
100	1.013	0.598	2675.9	2256.8	2.135	2.372	18.58	11.97	20.02	1.08
110	1.43	0.826	2691.4	2230.4	2.177	2.489	13.83	12.46	15.07	1.09
120	1.98	1.121	2706.8	2202.8	2.206	2.593	10.50	12.85	11.46	1.09
130	2.70	1.496	2720.3	2174.3	2.257	2.686	7.972	13.24	8.85	1.11
140	3.61	1.966	2734.1	2145.0	2.315	2.791	6.130	13.54	6.89	1.12
150	4.76	2.547	2746.7	2114.4	2.395	2.884	4.828	13.93	5.47	1.16
160	6.18	3.258	2758.0	2082.0	2.479	3.012	3.722	14.32	4.30	1.18
170	7.92	4.122	2768.9	2049.5	2.583	3.128	2.939	14.72	3.57	1.12
180	10.03	5.157	2778.5	2015.2	2.709	3.268	2.389	15.11	2.93	1.25
190	12.55	6.394	2786.4	1978.4	2.865	3.419	1.872	15.60	2.44	1.30
200	15.55	7.862	2793.1	1940.8	3.023	3.547	1.492	15.99	2.03	1.36
210	19.08	9.588	2798.2	1900.5	3.199	3.722	1.214	16.38	1.71	1.41
220	23.20	11.62	2801.5	1857.8	3.408	3.896	0.983	16.87	1.45	1.47
230	27.98	13.99	2803.2	1813.0	3.634	4.094	0.806	17.36	1.24	1.54
240	33.48	17.76	2803.2	1765.6	3.881	4.291	0.658	17.76	1.06	1.61
250	38.78	19.98	2801.1	1715.8	4.158	4.517	0.544	18.25	0.913	1.68
260	46.94	23.72	2796.5	1661.4	4.468	4.803	0.453	18.84	0.794	1.76
270	55.05	28.09	2789.8	1604.4	4.815	5.106	0.378	19.32	0.688	1.82
280	64.19	33.19	2779.7	1542.9	5.234	5.489	0.313	19.91	0.600	1.90
290	74.45	39.15	2766.4	1476.3	5.694	5.827	0.261	20.60	0.526	2.01
300	85.92	46.21	2749.4	1404.3	6.280	6.268	0.216	21.29	0.461	2.13

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі. Теплові процеси – 1»

Прийняв:
Казак
Ірина Олександрівна
Захищено з оцінкою

Виконав:
Косенко Євген Ігорович
студент групи ЛУ-21
факультет ІХФ

Київ
201

Список рекомендованої літератури

1. Малиновский В.В. Расчеты оборудования химических производств. Примеры и задания / В.В.Малиновский, И.В. Коваленко.– К.: УМК ВО, 1988. – 220 с.
2. Малиновский В.В. Тепловые процессы в технологи переработки пластмасс. Текст лекцій / В.В.Малиновский. – К.: КПИ, 1980. – 68с.
3. Малиновский В.В. Гидродинамические процессы в химической технологии. Текст лекцій / В.В.Малиновский. – К.: КПИ, 1987. – 68 с.
4. Малиновський В.В. Процеси та апарати хімічної технології в прикладах і завданнях / В.В.Малиновський, І.В.Коваленко.– К.: УМК ВО, 1992.– 192 с.
5. Малиновский В.В. Основные процессы химических производств / В.В.Малиновский, И.В. Коваленко.– К.: УМК ВО, 1990. – 228 с.
6. Малиновский В.В., Коваленко И.В. Процессы и аппараты химической технологии в примерах и задачах. – К.: УМК ВО , 1992. – 196 с.
7. Коваленко І.В., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв: Підручник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: “Інрес”, “Воля”, 2006. – 261с.
8. Коваленко І.В. Навчальні дослідження процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: Навчальний посібник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: “Норіта-плюс”, 2006. – 160с.
9. Коваленко І.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв. Навчальний посібник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський.– К: “Норіта-плюс”, 2006. – 212с.
10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

Зміст

Вступ	3
1. Загальні положення щодо організації розрахункової роботи студентів.....	4
2. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація».....	6
3. Методика виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація».....	7
4. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача».....	13
5. Методика виконання розрахунку задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»	14
6. Варіанти завдань до розрахункової роботи студентів.....	25
Додатки.....	27
Список рекомендованої літератури	32